



**Уральский
федеральный
университет**

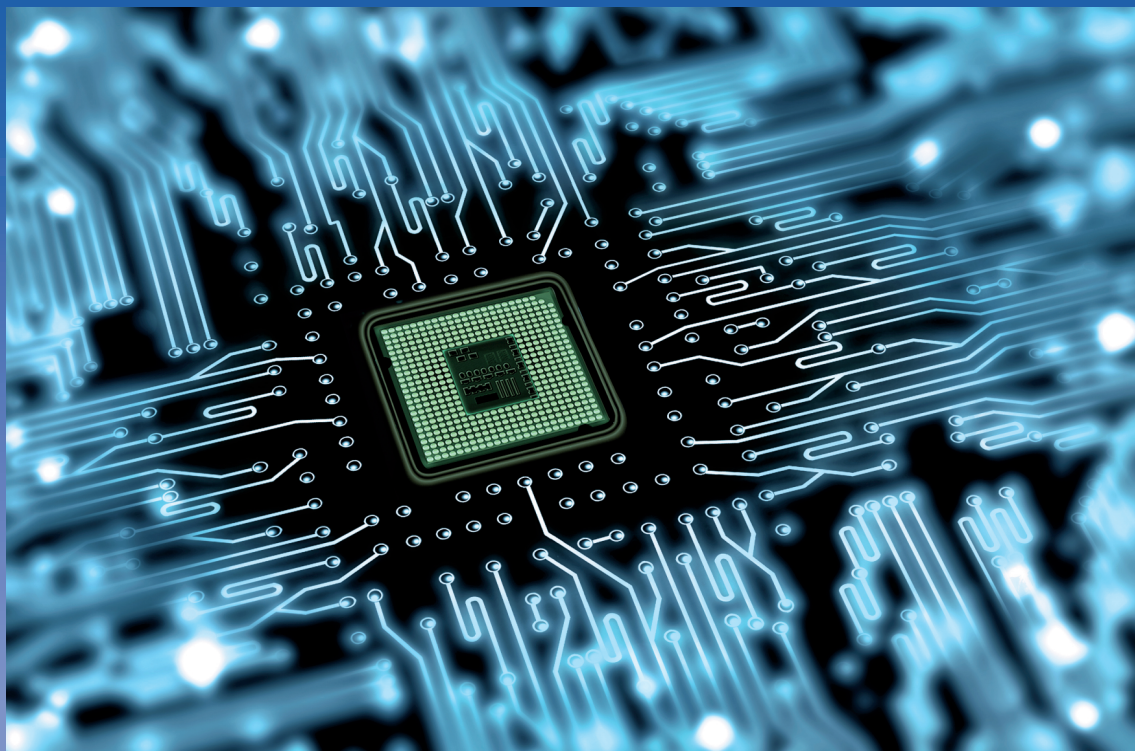
имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина

**Институт радиоэлектроники
и информационных
технологий — РТФ**

**А. А. ДУРНАКОВ
В. И. ЕЛФИМОВ**

ЭЛЕКТРОНИКА

Учебно-методическое пособие



Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

А. А. ДУРНАКОВ, В. И. ЕЛФИМОВ

ЭЛЕКТРОНИКА

Учебно-методическое пособие

Рекомендовано методическим советом УрФУ
для студентов всех форм обучения по направлениям:
210400 — Радиотехника;
230400 — Информационные системы и технологии;
090106 — Информационная безопасность
телекоммуникационных систем;
230201 — Информационные системы и технологии

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2016

УДК 621.38(075.8)

ББК 32.85я73

Д84

Рецензенты:

Уральский горно-геологический университет, кафедра информатики,
зав. кафедрой, канд. техн. наук, доц. *А. В. Дружинин*;
канд. физ.-мат. наук *В. Б. Костоусов* (Институт математики и механики
им. Н. Н. Красовского УрО РАН)

Научный редактор — канд. техн. наук, доц. *Н. П. Никитин*

На обложке использовано изображение с сайта gizmodo.com.au

Дурнаков, А. А.

Д84 Электроника : учебно-методическое пособие / А. А. Дурнаков,
В. И. Елфимов. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. —
160 с.

ISBN 978-5-7996-1787-5

Пособие содержит описания физических процессов, возникающих в p - n -переходе, виды пробоев p - n -перехода, процессы в p - n -переходах с туннельным эффектом, устройство, принципы работы, характеристики и параметры биполярных транзисторов и полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом. Приводятся описание схем экспериментальных исследований, лабораторные задания, методика обработки результатов эксперимента, вопросы для самопроверки.

Библиогр.: 30 назв. Табл. 13. Рис. 76. Прил. 16.

УДК 621.38(075.8)

ББК 32.85я73

ISBN 978-5-7996-1787-5

© Уральский федеральный
университет, 2016

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫХ ПЕРЕХОДАХ

1.1. Понятие и образование электронно-дырочного перехода

Электрическим переходом называется переходный слой между областями твердого тела с различными типами или значениями проводимости: например, между областями полупроводников *n*- и *p*-типов, металлом и полупроводником, диэлектриком и полупроводником и т. д.

Переход между областями полупроводника с электропроводностью *p*- и *n*-типов называют *электронно-дырочным переходом*, или *p-n-переходом*.

Рассмотрим образование несимметричного *p-n*-перехода при идеальном контакте двух полупроводников с различным типом проводимости. Через плоскость металлургического контакта (плоскость, где изменяется тип примесей, преобладающих в полупроводниках) возникает диффузия из-за градиента концентрации носителей заряда. В результате диффузии носителей заряда нарушается электрическая нейтральность примыкающих к металлургическому контакту частей монокристалла полупроводника.

Пусть концентрация акцепторов N_a в области полупроводника *p*-типа больше концентрации доноров N_d в области полупроводника *n*-типа: $N_a \gg N_d$. При этом концентрация основных носителей заряда — дырок в полупроводнике *p*-типа — будет больше концентрации основных носителей заряда — электронов в полупроводнике *n*-типа:

$p_p > n_n$. Соответственно, концентрация неосновных носителей заряда — электронов в полупроводнике p -типа — меньше концентрации неосновных носителей заряда — дырок в полупроводнике n -типа: $n_p < p_n$. Образование несимметричного p - n -перехода посредством металлургического контакта двух полупроводников с различным типом проводимости показано на рис. 1. Там же указано, что внешнее напряжение на переход не подается, а p - и n -области соединены между собой, подтверждая рассмотрение p - n -перехода в равновесном состоянии.

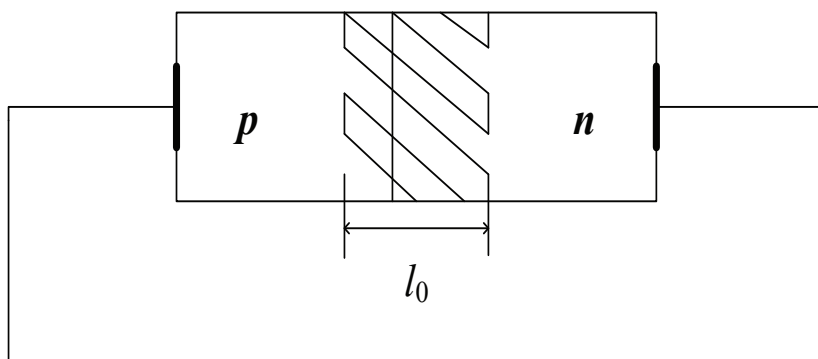


Рис. 1. Образование несимметричного p - n -перехода посредством металлургического контакта двух полупроводников

Допустим, $N_a = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, а $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Поясним процесс образования p - n -перехода с помощью диаграмм, представленных на рис. 2.

На рис. 2 обозначено:

- + дырка — основной носитель заряда полупроводника p -типа;
- электрон — основной носитель заряда полупроводника n -типа;



— положительный ион донора;



— отрицательный ион акцептора;

l_p — ширина p - n -перехода в области полупроводника p -типа; l_n — ширина p - n -перехода в области полупроводника n -типа; l_0 — ширина p - n -перехода в равновесном состоянии.

Распределения концентраций основных и неосновных носителей заряда в полупроводниках определяются из закона действующих масс. Так, для полупроводника p -типа закон действующих масс записывается в виде: $n_i^2 = p_p \cdot n_p = N_a \cdot n_p$. Допустим, что для изготовления p - n -перехода используется полупроводниковый материал германий,

у которого собственная концентрация (концентрация свободных носителей заряда в полупроводнике i -типа) носителей заряда составляет величину: $n_{iGE} = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. При условии $p_p = N_a = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, из закона действующих масс находим, что $n_p = 6,25 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$. В полупроводнике n -типа закон действующих масс определяется соотношением: $n_i^2 = n_n \cdot p_n = N_d \cdot p_n$. При условии $n_n = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ из закона действующих масс получаем, что $p_n = 6,25 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$. В результате разности концентраций подвижных носителей заряда на границе контакта полупроводников p - и n -типов (диаграмма 2 на рис. 2) образуется **градиент концентрации** носителей заряда каждого знака. Под действием градиента концентрации будет происходить **диффузия основных носителей заряда** из области с высокой концентрацией в область с меньшей их концентрацией. Дырки переходят из области полупроводника p -типа в область полупроводника n -типа, оставляя в p -области отрицательные ионы акцепторов. В области полупроводника n -типа дырки рекомбинируют с электронами, обнажая в процессе рекомбинации положительно заряженные ионы доноров.

Аналогично и электроны из области полупроводника n -типа переходят в область полупроводника p -типа, оставляя в полупроводнике n -типа положительные ионы доноров. В области полупроводника p -типа при рекомбинации электронов с дырками дополнительно обнажаются отрицательные ионы акцепторов. Отрицательные ионы акцепторов и положительные ионы доноров находятся в узлах кристаллической решетки, поэтому не могут двигаться по кристаллу полупроводника. Таким образом, вблизи контакта полупроводников с различным типом проводимости возникает двойной слой пространственного заряда: отрицательный в области полупроводника p -типа, положительный в области полупроводника n -типа (диаграмма 1 на рис. 2).

В области объемных зарядов мала концентрация подвижных носителей заряда, поэтому этот слой обладает повышенным сопротивлением и называется запиорным слоем или p - n -переходом.

Итак, **электронно-дырочный** или **p - n -переход** — это тонкий слой полупроводника, возникающий на границе раздела двух полупроводников с разным типом проводимости, который обеднен подвижными носителями тока и обладает высоким сопротивлением.

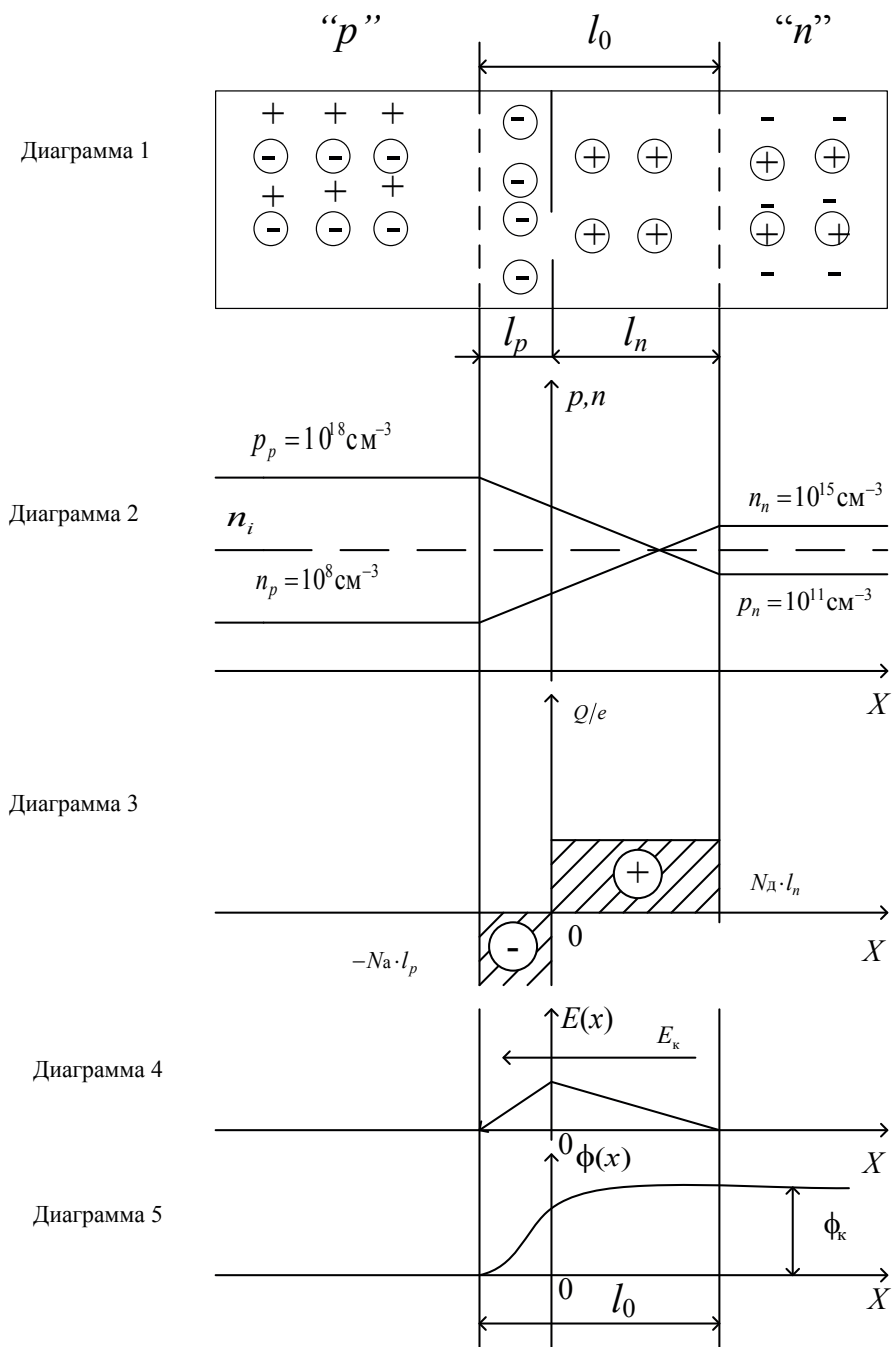


Рис. 2. Диаграммы, поясняющие процесс образования p - n -перехода

Ширина p - n -перехода может быть найдена при интегрировании уравнения Пуассона, которое определяет распределение напряженности электрического поля $E(x)$ и потенциала $\phi(x)$. При этом получают:

$$l_0 = l_p + l_n = \sqrt{\frac{2 \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot \phi_K}{e} \cdot \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)}, \quad (1)$$

где μ — диэлектрическая проницаемость полупроводника; μ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума (электрическая постоянная); e — заряд электрона; ϕ_K — контактная разность потенциалов; N_a — концентрация акцепторов; N_d — концентрация доноров.

Так как $N_a \gg N_d$, то $l_p \ll l_n$, и приближенно можно записать

$$l_0 \approx l_n \approx \sqrt{\frac{2 \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot \phi_K}{e} \cdot \frac{1}{N_d}}. \quad (2)$$

Распределение напряженности электрического поля и потенциала в p - n -переходе (диаграммы 4 и 5 на рис. 2) получают из решения уравнения Пуассона.

При увеличении концентрации примеси возрастает максимальное значение напряженности электрического поля в p - n -переходе. Электрическое поле препятствует переходу основных носителей заряда через p - n -переход. При контакте двух полупроводников возникает **потенциальный барьер**, распределение потенциала вдоль p - n -перехода показано на диаграмме 5 на рис. 2. Функция $\phi(x)$ также получается путем двойного интегрирования уравнения Пуассона. Причем $\phi(x)$ состоит из двух параболических участков, поскольку она получена интегрированием кусочно-линейной функции $E(x)$ и имеет точку перегиба при $x = 0$. Высота потенциального барьера в равновесном состоянии равна **контактной разности потенциалов** ϕ_K :

$$\phi_K = \phi_T \cdot \ln\left(\frac{n_p \cdot p_p}{n_i^2}\right) = \frac{k \cdot T}{e} \cdot \ln\left(\frac{N_d \cdot p_p}{n_i^2}\right) = \frac{k \cdot T}{e} \cdot \ln\left(\frac{N_d \cdot N_a}{n_i^2}\right), \quad (3)$$

так как $p_p = n_i + N_a \approx N_a$, $N_a \gg n_i$ ($n_i = p_i$)

Контактная разность потенциалов зависит от температуры окружающей среды. С увеличением температуры контактная разность потенциалов уменьшается. Это связано с тем, что в выражении для ϕ_K с увеличением температуры окружающей среды возрастает значение

температурного потенциала ϕ_T , но $n_i = A \cdot T^{3/2} \cdot \exp(-\Delta W_3 / 2 \cdot k \cdot T)$ также возрастает, и это увеличение происходит быстрее, чем рост температурного потенциала, поэтому контактная разность потенциалов при увеличении температуры уменьшается.

1.2. Энергетическая диаграмма p - n -перехода в равновесном состоянии

В условиях равновесия p - n -перехода, когда отсутствует внешнее напряжение, энергия Ферми одинакова для любого объема полупроводника, что приводит к горизонтальности положения уровня Ферми на энергетической диаграмме, представленной на рис. 3.

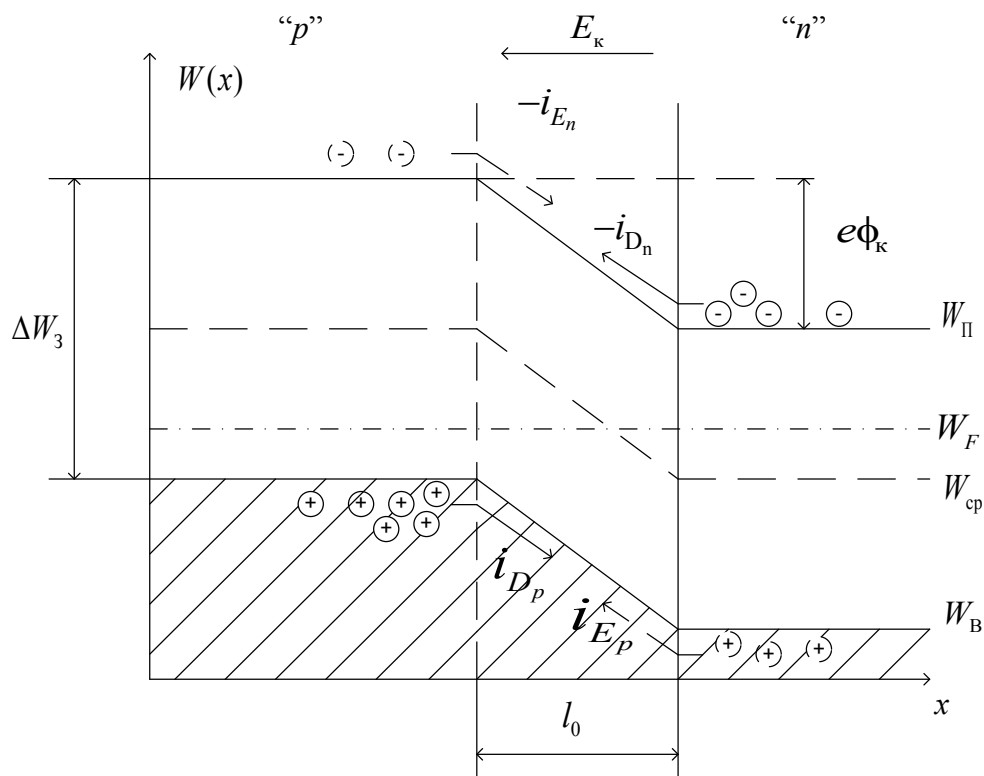
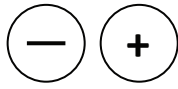
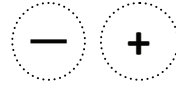


Рис. 3. Энергетическая диаграмма p - n -перехода в равновесном состоянии

На рис. 3 обозначено:



— основные носители заряда;



— неосновные носители заряда;

W_n — энергетический уровень дна зоны проводимости; W_F — энергетический уровень Ферми; W_{cp} — энергетический уровень середины запрещенной зоны; W_b — энергетический уровень потолка валентной зоны; ΔW_z — энергия, соответствующая ширине запрещенной зоны.

Уровень Ферми в полупроводнике p -типа расположен вблизи энергетического уровня потолка валентной зоны, а в полупроводнике n -типа — вблизи энергетического уровня дна зоны проводимости, причем уровень Ферми ближе расположен к энергетическому уровню потолка валентной зоны, чем к энергетическому уровню дна зоны проводимости, из-за того, что $N_a \gg N_d$. У изолированных p - и n -областей энергии Ферми неравны, поэтому при объединении областей в единый кристалл полупроводника на основании фундаментального свойства уровня Ферми ($\text{grad } W_F = 0$) происходит смещение энергетических уровней n -области относительно энергетических уровней p -области, как и показано на рис. 3. В результате смещения энергетических уровней создается энергетический (потенциальный) барьер величиной

$$e \cdot \phi_k = W_{F_n} - W_{F_p}.$$

Основные носители заряда областей полупроводника p - и n -типов, энергия которых больше высоты барьера, диффузионно преодолевают его. Основные носители заряда, переходящие p - n -переход в тормозящем для них электрическом поле, образуют диффузионную составляющую тока перехода i_D . В то же время неосновные носители заряда, находящиеся вблизи p - n -перехода и совершающие тепловое хаотическое движение, попадают под действие электрического поля p - n -перехода, увлекаются им и переносятся в противоположную область: электроны p -области — в n -область; дырки n -области — в p -область. Неосновные носители заряда, переходящие переход под действием напряженности электрического поля E_k p - n -перехода, образуют дрейфовую составляющую тока i_E через переход. Условие равновесия выполняется, когда диффузионный ток i_D будет компенсирован встречным дрейфовым током i_E и полный ток через переход будет равен нулю: $i_D + i_E = 0$.

1.3. Неравновесное состояние p - n -перехода

1.3.1. Прямосмещенный p - n -переход

Если к p -области подсоединить положительный полюс внешнего источника напряжения, а к n -области — отрицательный, такое включение p - n -перехода получает название прямого смещения p - n -перехода.

В этом случае под действием внешнего электрического поля основные носители заряда начнут перемещаться в сторону p - n -перехода. На рис. 4 представлены схема включения p - n -перехода в прямом направлении и диаграмма распределения потенциала вдоль p - n -перехода.

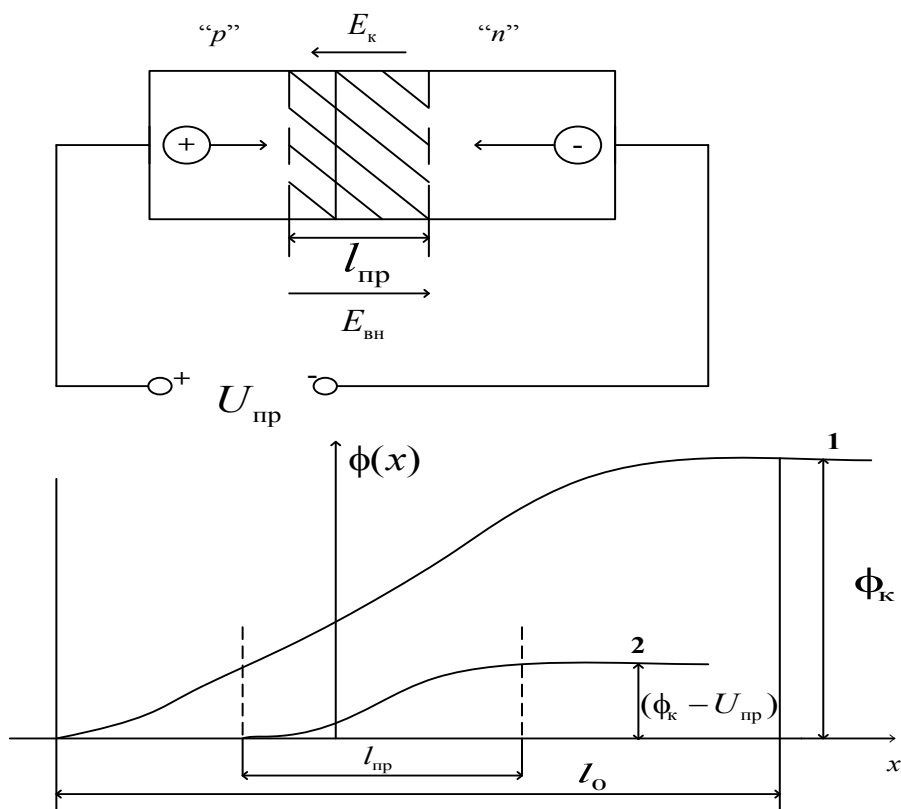


Рис. 4. Схема включения p - n -перехода при прямом смещении и потенциальная диаграмма p - n -перехода

На рис. 4 обозначено: $U_{пр}$ — напряжение внешнего источника, приложенного к p - n -переходу в прямом направлении (прямое

смещение p - n -перехода); $E_{\text{вн}}$ — напряженность внешнего электрического поля; 1 — распределение потенциала вдоль p - n -перехода в равновесном состоянии; 2 — распределение потенциала вдоль p - n -перехода при прямом смещении; l_0 — ширина p - n -перехода в равновесном состоянии; $l_{\text{пр}}$ — ширина p - n -перехода при подаче прямого напряжения $U_{\text{пр}}$.

При подаче внешнего напряжения на p - n -переход изменяется его ширина, что видно из потенциальной диаграммы на рис. 4. При этом ширина прямосмещенного p - n -перехода находится из выражения:

$$l_{\text{пр}} = l_0 \cdot \sqrt{\frac{\phi_k - U_{\text{пр}}}{\phi_k}}, \quad (4)$$

$$\text{где } l_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot \mu_0 \cdot \mu \cdot \phi_k}{e} \cdot \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)}.$$

Из потенциальной диаграммы на рис. 4 следует, что при прямом смещении высота потенциального барьера снижается и становится равной

$$\phi_{\text{пр}} = \phi_k - U_{\text{пр}}. \quad (5)$$

Это приводит к резкому увеличению тока диффузии через переход: $i_D = i_{Dp} + i_{Dn}$, так как все больше основных носителей заряда оказывается способными преодолеть меньший потенциальный барьер. В несимметричном p - n -переходе ток диффузии создается в основном потоком дырок из p -области в n -область, так как встречный поток электронов мал и им можно пренебречь: $(N_a = 10^{18} \text{ см}^{-3}) \gg (N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3})$; $i_{Dp} \gg i_{Dn}$. При этом в n -области существенно возрастает концентрация избыточных неосновных носителей заряда — дырок, перешедших из p -области. Это образование избыточной концентрации носителей заряда получило название **инжекции**.

Инжекцией называется процесс нагнетания носителей заряда в полупроводник, для которого они являются неосновными носителями заряда.

Область, инжектирующая носители заряда, называется **эмиттером**. Эта область сильно легирована примесями и имеет низкое удельное электрическое сопротивление. Область, в которую инжектируются неосновные для нее носители заряда, называется **базой**. База меньше

легирована примесями и имеет большое значение удельного электрического сопротивления.

Энергетическая диаграмма p - n -перехода при прямом смещении приведена на рис. 5.

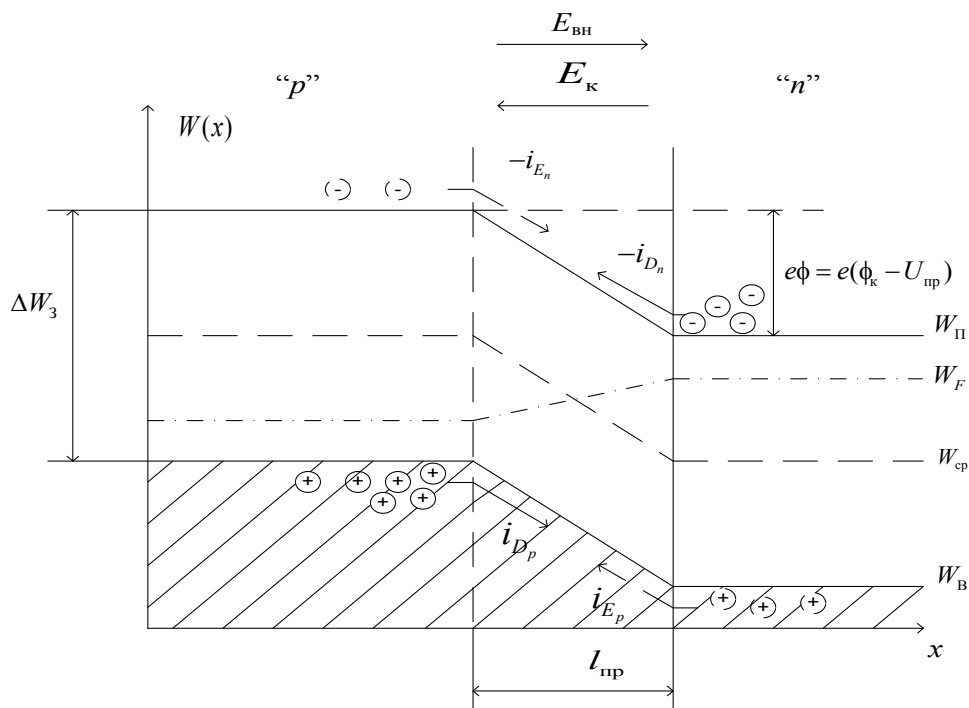


Рис. 5. Энергетическая диаграмма прямосмещенного p - n -перехода

При прямом смещении уровень Ферми полупроводника в n -области смещается вверх относительно его положения в p -области на величину, равную $e \cdot U_{пр}$. Соответственно, на эту же величину снижается высота энергетического барьера. При этом дрейфовая составляющая тока p - n -перехода не изменяется, так как условия перехода неосновных носителей заряда через p - n -переход остаются теми же, что и в равновесном состоянии, то есть переход неосновных носителей заряда происходит в ускоряющем электрическом поле p - n -перехода. Из-за снижения высоты энергетического барьера количество переходов основных носителей заряда в тормозящем электрическом поле p - n -перехода будет резко увеличиваться, соответственно, возрастает диффузионная составляющая тока перехода.

1.3.2. Обратносмещенный р-п-переход

Если к p -области подключить отрицательный полюс внешнего источника напряжения, а к n -области — положительный, то такое включение p - n -перехода получит название обратного смещения p - n -перехода. Схема включения p - n -перехода представлена на рис. 6.

Под действием обратного напряжения $U_{обр}$ основные носители заряда будут перемещаться от границ p - n -перехода вглубь областей. При этом ширина p - n -перехода увеличивается, что хорошо демонстрируется потенциальной диаграммой на рис. 6.

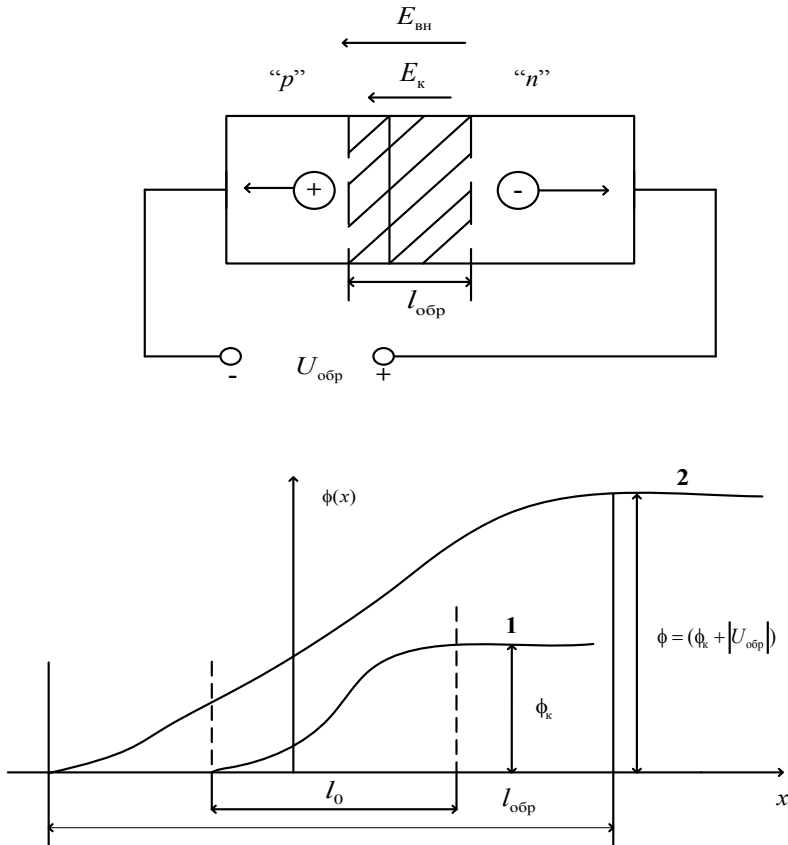


Рис. 6. Схема включения p - n -перехода при обратном смещении и потенциальная диаграмма p - n -перехода

На рис. 6 обозначено: l_0 — ширина p - n -перехода в равновесном состоянии, определяемая по зависимости; 1 — распределение потенциалов в равновесном состоянии p - n -перехода; $l_{обр}$ — ширина p - n -перехода

при обратном смещении, определяемая по зависимости; 2 — потенциальная диаграмма при обратном смещении p - n -перехода; ϕ_k — высота потенциального барьера в равновесном состоянии p - n -перехода; $(\phi_k + |U_{обр}|)$ — высота потенциального барьера при обратном смещении p - n -перехода.

Ширина обратносмещенного p - n -перехода определяется по формуле:

$$l_{обр} = l_0 \cdot \sqrt{\frac{\phi_k + |U_{обр}|}{\phi_k}} \approx l_0 \cdot \sqrt{\frac{|U_{обр}|}{\phi_k}}. \quad (6)$$

Приближенная запись для $l_{обр}$ оправдана, так как $|U_{обр}| \gg \phi_k$. Из формулы для $l_{обр}$ видно, что p - n -переход расширяется нелинейно с увеличением приложенного напряжения $U_{обр}$: сначала более быстро, затем расширение p - n -перехода замедляется.

При подаче $U_{обр}$ увеличивается потенциальный барьер, так как напряженность внешнего электрического поля $E_{вн}$ совпадает с направлением напряженности внутреннего электрического поля E_k , уменьшается число основных носителей заряда, способных его преодолеть, и ток диффузии уменьшается. Уже при $|U_{обр}| = (0,1-0,2)$ В ток диффузии становится равным нулю, а через p - n -переход протекает только ток неосновных носителей заряда, образующих дрейфовую составляющую тока.

В результате действия обратного напряжения снижается концентрация неосновных носителей заряда у границ p - n -перехода и появляется их градиент концентрации. Возникает диффузия неосновных носителей заряда к границам p - n -перехода, где они подхватываются электрическим полем p - n -перехода и переносятся через p - n -переход. Это поясняется диаграммой распределения концентраций основных и неосновных носителей заряда в областях p - n -перехода, приведенной на рис. 7, на котором обозначены L_n , L_p — длины диффузии электронов и дырок.

Как показано на рис. 7, концентрация неосновных носителей заряда на границах p - n -перехода практически падает до нуля. Снижение концентраций неосновных носителей заряда у границ p - n -перехода, появление градиента их концентрации и диффузия неосновных носителей заряда к p - n -переходу характеризуются *экстракцией*.

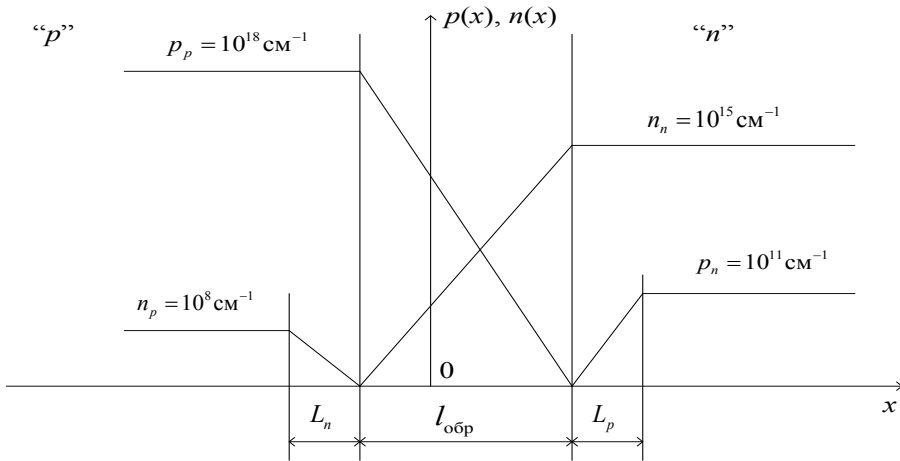


Рис. 7. Распределение концентраций носителей заряда в обратносмещенном p - n -переходе

Экстракцией называется извлечение неосновных носителей заряда из областей, примыкающих к p - n -переходу, под действием ускоряющего электрического поля.

Энергетическая диаграмма обратносмещенного p - n -перехода приведена на рис. 8.

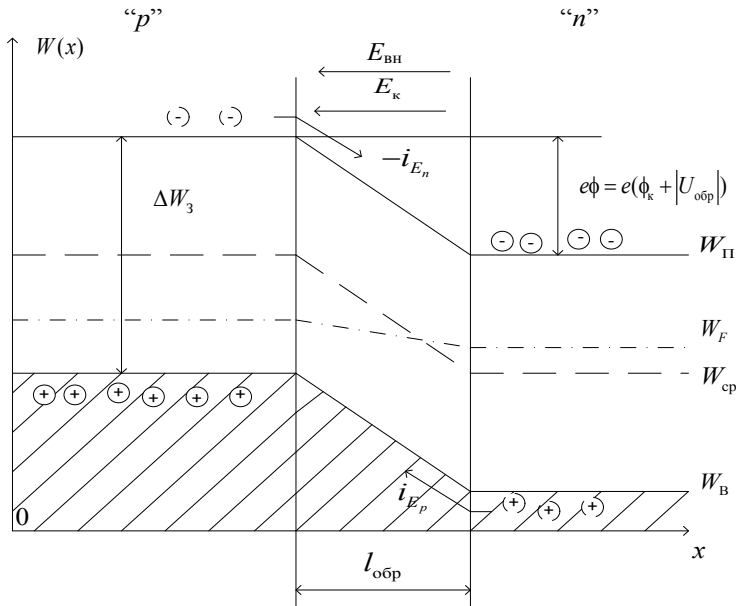


Рис. 8. Энергетическая диаграмма обратносмещенного p - n -перехода

Уровень Ферми в n -области опускается вниз на величину обратного напряжения. Обратный ток включает дрейфовую составляющую и равен:

$$i_E = i_{E_p} + i_{E_n} = e \cdot p_n \cdot \mu_p \cdot E + e \cdot n_p \cdot \mu_n \cdot E. \quad (7)$$

С учетом принятых допущений имеем $p_n \gg n_p$ и $i_{E_p} \gg i_{E_n}$, а следовательно, можно приближенно записать $i_E \approx i_{E_p}$.

1.4. Вольтамперная характеристика реального p - n -перехода

1.4.1. Прямая ветвь вольтамперной характеристики реального p - n -перехода

Под прямой ветвью вольтамперной характеристики (ВАХ) реального p - n -перехода понимается зависимость прямого тока перехода от величины прямого напряжения: $I_{np} = f(U_{np})$, которая описывается выражением:

$$I_{np} = I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{U_{np}}{\phi_T}\right) - 1 \right] \quad (8)$$

и должна быть экспоненциальной, как показано пунктиром на рис. 9, на котором сплошной линией изображена прямая ветвь ВАХ реального p - n -перехода.

На прямую ветвь ВАХ реального p - n -перехода оказывают влияние: материал полупроводника, используемый для изготовления p - n -перехода; сопротивление базы p - n -перехода; температура окружающей среды.

Характеристика близка к экспоненциальной только в начале зависимости на участке OA ВАХ, а далее рост тока при увеличении прямого напряжения замедляется, и характеристика становится более полой — участок AB ВАХ. Этот участок характеристики называют омическим, поскольку здесь оказывает влияние объемное сопротивление базы r_b p - n -перехода. Ток, протекая через r_b , создает падение напряжения:

$$U_{r_b} = I_{np} \cdot r_b, \quad (9)$$

с учетом которого уравнение ВАХ принимает вид:

$$I_{np} = I_0 \left[\exp\left((U_{np} - r_B \cdot I_{np})/\phi_T\right) - 1 \right]. \quad (10)$$

Объемное сопротивление базы находится по формуле $r_B = \rho_B \cdot W_B / S$, где ρ_B — удельное электрическое сопротивление полупроводника области базы; W_B — ширина базы; S — площадь сечения базы.

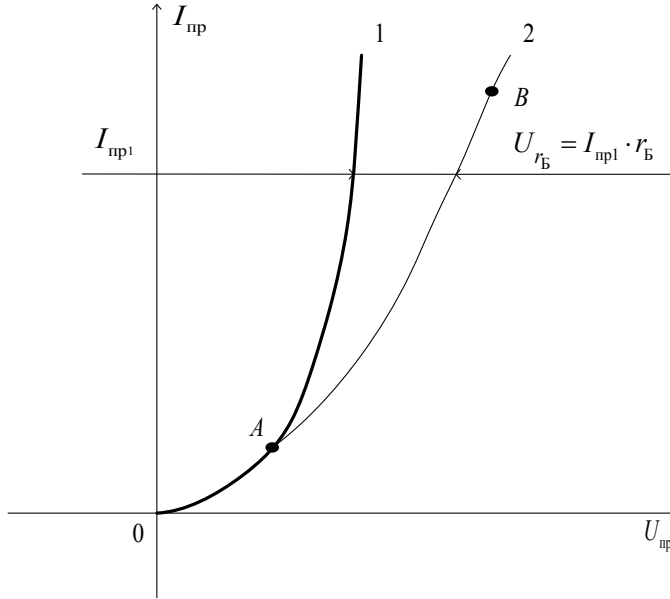


Рис. 9. Прямая ветвь ВАХ p - n -перехода: 1 — идеальный p - n -переход; 2 — реальный p - n -переход

Влияние объемного сопротивления базы на прямую ветвь ВАХ реального p - n -перехода проявляется в виде смещения прямой ветви в сторону больших значений прямых напряжений. Поэтому, чем больше r_B , тем *положе* идет прямая ветвь ВАХ реального p - n -перехода, как и отмечено на рис. 9. Как правило, p - n -переходы с большими значениями r_B выполняются для повышения высоковольтности, то есть для увеличения допустимого рабочего обратного напряжения на p - n -переходе.

Даже при одинаковых условиях (одинаковая концентрация примесей; постоянная температура окружающей среды) ВАХ p - n -переходов, выполненных из разных полупроводниковых материалов, различны. Главная причина этого отличия — различное значение ширины запре-

щенной зоны полупроводниковых материалов. Чтобы появился прямой ток, необходимо уменьшить величину потенциального барьера. Для этого на p - n -переход нужно подать прямое напряжение, близкое к значению контактной разности потенциалов. В p - n -переходе на основе германия $\phi_k = 0,3-0,4$ В, в p - n -переходе на основе кремния $\phi_k = 0,6-0,8$ В, а в p - n -переходе на основе арсенида галлия $\phi_k = 1,0-1,2$ В, поэтому прямая ветвь ВАХ кремниевого p - n -перехода относительно германиевого смещается вправо на $(0,3-0,5)$ В, а в p - n -переходе на основе арсенида галлия это смещение ВАХ происходит еще больше.

С увеличением температуры окружающей среды растет прямой ток p - n -перехода. Выражение для прямого тока можно записать в виде:

$$I_{np} \approx I_0 \cdot \left[\exp(U_{np}/\phi_T) \right]. \quad (11)$$

Отсюда следует, что при увеличении температуры показатель степени экспоненты уменьшается, но ток I_0 растет быстрее, как отмечалось, он удваивается при увеличении температуры на каждые 10°C , и используя выражение для I_0 , можно записать выражение для прямого тока в виде:

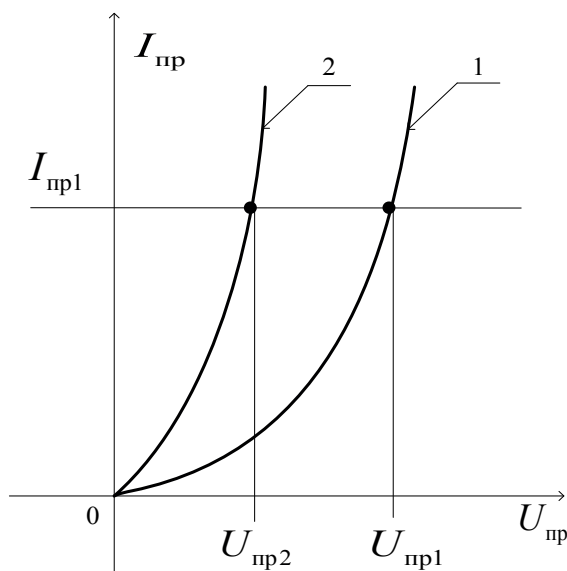
$$I_{np} = \text{const} \cdot \exp \left[-\frac{(\Delta W_3 - e \cdot U_{np})}{k \cdot T} \right]. \quad (12)$$

Влияние температуры на прямую ветвь ВАХ реального p - n -перехода представлено на рис. 10.

Для оценки влияния температуры вводится **температурный коэффициент напряжения** прямой ветви, под которым понимается величина, показывающая, насколько изменится прямое напряжение для получения одной и той же величины прямого тока при изменении температуры на 1 градус.

$$\text{ТКН}_{np} = \frac{\Delta U_{np}}{\Delta T} \bigg|_{I_{np} = \text{const}} = (U_{np2} - U_{np1}) / (T2 - T1) \bigg|_{I_{np} = I_{np1}} \approx -(1-3) \text{ мВ}/^\circ\text{C}.$$

Как видно, значение ТКН меньше нуля. Физическое объяснение этого факта сводится к следующему. При увеличении температуры уменьшается контактная разность потенциалов, энергия основных носителей заряда возрастает, соответственно растет диффузионная составляющая тока и прямой ток увеличивается.

Рис. 10. Влияние температуры на прямую ветвь ВАХ p - n -перехода:1 — $T_1 = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 — $T_2 = +50\text{ }^{\circ}\text{C}$

1.4.2. Обратная ветвь ВАХ реального p - n -перехода

Под обратной ветвью вольтамперной характеристики реального p - n -перехода понимается зависимость обратного тока от значения обратного напряжения: $I_{\text{обр}} = f(U_{\text{обр}})$. Данная зависимость приведена на рис. 11. Отличие реальной обратной ветви ВАХ p - n -перехода от идеальной состоит в следующем: обратный ток растет при увеличении обратного напряжения p - n -перехода и имеет значение большее I_0 . Это объясняется тем, что в реальном p - n -переходе обратный ток содержит несколько составляющих:

$$I_{\text{обр}} = I_0 + I_{\text{т/г}} + I_{\text{у}},$$

где I_0 — ток насыщения или тепловой ток; $I_{\text{т/г}}$ — ток термогенерации; $I_{\text{у}}$ — ток утечки. Следует отметить, что обратный ток кремниевых p - n -переходов много меньше обратного тока германиевых p - n -переходов. Это связано с различием ширины запрещенной зоны: $\Delta W_{\text{з Ge}} = 0,72\text{ эВ}$; $\Delta W_{\text{з Si}} = 1,12\text{ эВ}$. Обратный ток определяется в основном неосновными носителями заряда, имеющими место в примесном полупроводнике. Так, например, в полупроводнике n -типа это дырки p_n , которые определяются в соответствии с законом дей-

ствующих масс: $p_n = n_i^2/n_n \approx n_i^2/N_d$. Известно, что $n_i \text{ Ge} \approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$, а $n_i \text{ Si} \approx 10^{10} \text{ см}^{-3}$, и при равной концентрации примеси получаем, что концентрация неосновных носителей заряда в кремниевом полупроводнике на шесть порядков меньше, чем в германиевом примесном полупроводнике, а это приводит к значительной разнице значений обратного тока.

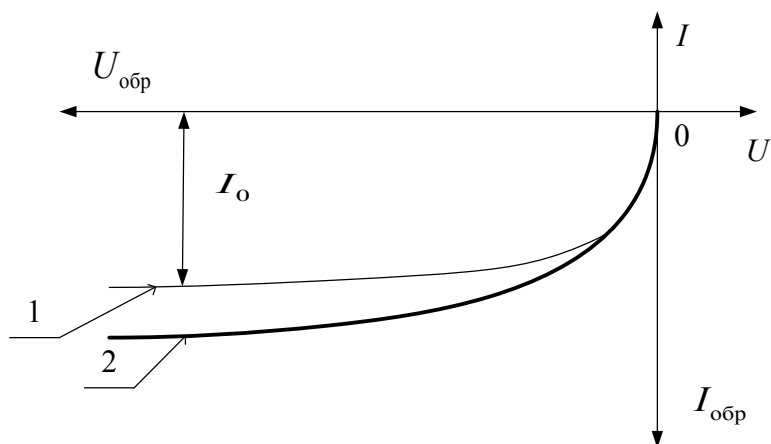


Рис. 11. Обратная ветвь ВАХ реального p - n -перехода

Обратный ток германиевого p - n -перехода включает составляющие: $I_{\text{обрGe}} \approx I_0 + I_y$, а обратный ток кремниевых p - n -перехода — $I_{\text{обрSi}} \approx I_{\text{т/г}} + I_y$. Для германиевых p - n -переходов обратный ток в основном определяется током насыщения и имеет величину десятков микроампер. Ток термогенерации у них мал, и им обычно пренебрегают. Незначительный наклон обратной ветви ВАХ германиевых p - n -переходов обусловлен током утечки. Обратный ток кремниевых p - n -перехода примерно на три-четыре порядка меньше обратного тока германиевого перехода. Объясняется это тем, что ширина запрещенной зоны у кремния больше, чем у германия, а концентрация неосновных носителей заряда оказывается на шесть порядков ниже. Поэтому ток I_0 в кремниевом p - n -переходе пренебрежимо мал, а ток термогенерации невелик из-за малого объема p - n -перехода, ток утечки при современной технологии изготовления p - n -перехода имеет незначительную величину. Отсюда в целом обратный ток кремниевых p - n -перехода имеет небольшое значение.

1.5. Лабораторное задание № 1 «Исследование характеристик и параметров полупроводниковых диодов»

Цель работы

Ознакомиться с физическими основами работы электронно-дырочных переходов, приобрести навыки экспериментального исследования полупроводниковых приборов, исследовать влияние материала полупроводника и температуры окружающей среды на характеристики и параметры полупроводниковых диодов.

1. Записать параметры исследуемых диодов (см. таблицы П.1, П.2 или [18–20]).

2. Собрать схему измерений для снятия прямой ветви ВАХ германиевого полупроводникового диода (рис. 12).

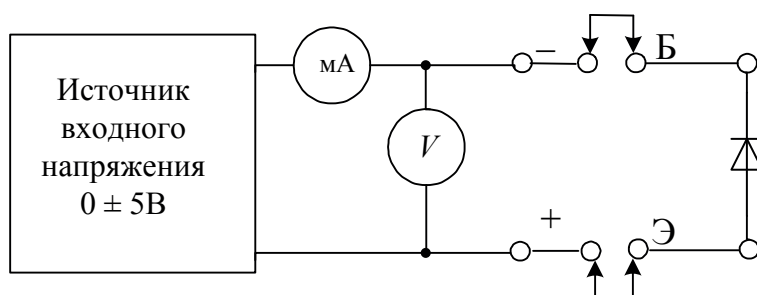


Рис. 12. Схема лабораторной установки для снятия прямой ветви ВАХ полупроводникового диода

3. Снять прямую ветвь ВАХ германиевого диода $U_{\text{прям}} = f(I_{\text{прям}})$, изменяя прямой ток в пределах от 0 до 100 мА. Результаты измерений свести в таблицу 1.

Это важно!

При снятии прямой ветви ВАХ задаются значением прямого тока, а не напряжения, как следует из определения понятия прямой ветви ВАХ, так как ВАХ имеет экспоненциальный характер и в области больших прямых токов малым изменениям напряжения соответствуют значительные изменения прямого тока.

Таблица 1

**Пример оформления экспериментальных данных
при снятии прямой ветви ВАХ**

$I_{\text{пр}}, \text{ мА}$	0	1	5	10	30	50	70	100
$U_{\text{пр}}, \text{ В при } T_1 =$								
$U_{\text{пр}}, \text{ В при } T_2 =$								

4. Собрать схему для снятия обратной ветви вольтамперной характеристики германиевого электронно-дырочного перехода (рис. 13).

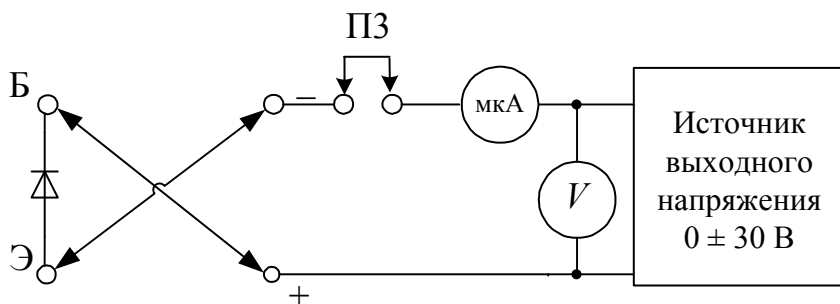


Рис. 13. Схема лабораторной установки для снятия обратной ветви ВАХ полупроводникового диода

5. Снять обратную ветвь ВАХ германиевого диода $I_{\text{обр}} = f(U_{\text{обр}})$, изменяя значение обратного напряжения в диапазоне от 0 до 30 В и отмечая при этом получающиеся величины обратного тока. Результаты измерений свести в таблицу 2.

Таблица 2

**Пример оформления экспериментальных данных
при снятии обратной ветви ВАХ**

$U_{\text{обр}}, \text{В}$	0	0,05	0,1	0,2	1	10	15	25
$I_{\text{обр}}, \text{мкА}$ при $T_1 =$								
$I_{\text{обр}}, \text{мкА}$ при $T_2 =$								

6. Исследуемый германиевый диод поместить в термостат, предварительно разогретый до температуры 50 °С. Через 5 минут повторить пункты 2–5.

7. Собрать схему измерений для снятия прямой ветви ВАХ кремниевого диода (рис. 12).

8. Снять при комнатной температуре прямую ветвь ВАХ кремниевого диода $U_{\text{прям}} = f(I_{\text{прям}})$, изменяя прямой ток в пределах от 0 до 100 мА. Результаты измерений свести в таблицу 1.

9. Собрать схему для снятия обратной ветви вольтамперной характеристики кремниевого диода (рис. 13).

10. Снять при комнатной температуре обратную ветвь ВАХ кремниевого перехода $I_{\text{обр}} = f(U_{\text{обр}})$, изменяя значение обратного напряжения в диапазоне от 0 до 30 В и отмечая при этом получающиеся величины обратного тока. Результаты измерений свести в таблицу 2.

11. Довести температуру термостата до 70–75 °С. Поместить в термостат исследуемый кремниевый диод и через 5 минут повторить пункты 7–10.

Обработка результатов эксперимента

1. Построить ВАХ исследованных диодов при комнатной и повышенной температурах.

2. Определить $U_{\text{пр}}$ при $I_{\text{пр. макс}}$ и $I_{\text{обр}}$ при $U_{\text{обр. макс}}$ для комнатной и повышенной температур.

3. Определить дифференциальное сопротивление, используя формулу $r_{\text{диф}} = \Delta U_{\text{пр}} / \Delta I_{\text{пр}}$, в рабочих точках, соответствующих значениям прямого тока: $I_{\text{пр}} = I_{\text{пр. макс}}$; $I_{\text{пр}} = 0,5 \cdot I_{\text{пр. макс}}$; $I_{\text{пр}} = 0,1 \cdot I_{\text{пр. макс}}$. Приращенные напряжения и тока при определении дифференциального сопротивления необходимо брать в окрестностях указанных рабочих точек.

4. Определить сопротивление прямому току исследованных переходов по формуле $R_{\text{пр}} = U_{\text{пр}}/I_{\text{пр}}$ для трех значений прямого тока: $I_{\text{пр}} = I_{\text{пр. макс}}$; $I_{\text{пр}} = 0,5 \cdot I_{\text{пр. макс}}$; $I_{\text{пр}} = 0,1 \cdot I_{\text{пр. макс}}$.

5. Определить сопротивление обратному току, используя соотношение $R_{\text{обр}} = U_{\text{обр}}/I_{\text{обр}}$, при $U_{\text{обр}} = U_{\text{обр. макс}}$ для комнатной и повышенной температур.

6. Рассчитать дифференциальное сопротивление теоретической ВАХ при $T = 300$ К и $\phi_T = 25$ мВ, используя соотношение $r_{\text{диф}} \approx 25/I_{\text{пр}}$ (значение тока подставляется в миллиамперах, тогда значение $r_{\text{диф}}$ получается в Омах), для тех же значений прямого тока, что и в пункте 3.

7. По измеренному у германиевого диода при комнатной температуре значению обратного тока I_0 и уравнению ВАХ $I = I_0 \cdot (\exp [U/\phi_T] - 1)$, где при комнатной температуре $T = 300$ К $\phi_T \approx 25$ мВ, построить теоретическую ВАХ.

8. Для кремниевого диода по измеренному значению $I_{\text{пр}} = I_{\text{пр. макс}}/2$ и соответствующему ему напряжению $U_{\text{пр}}$ для комнатной температуры вычислить значение I_0 по формуле: $I_0 = I_{\text{пр}}/\exp [U_{\text{пр}}/\phi_T]$, считая $\phi_T \approx 25$ мВ.

9. Определить для исследованных диодов температурные коэффициенты:

$$\text{TKN}_{\text{пр}} = \Delta U_{\text{пр}}/\Delta T, \text{ при } I_{\text{пр}} = 0,5 \cdot I_{\text{пр. макс}} \quad (13)$$

$$\text{TKI}_{\text{обр}} = (T_2 - T_1) / \sqrt[10]{I_2/I_1}, \quad (14)$$

где $\Delta T = T_2 - T_1$; $I_{\text{обр1}}$ и $I_{\text{обр2}}$ значения обратного тока при температурах окружающей среды, соответственно T_1 и T_2 , и $U_{\text{обр}} = U_{\text{обр. макс}}$.

Справочные данные и рассчитанные параметры свести в сводную таблицу 3.

Таблица 3

Справочные и расчетные данные исследованных диодов

Тип диодов		
Параметры		
Справочные данные		
$I_{\text{пр}}$, мА		
$U_{\text{пр}}$, В		

Окончание табл. 3

$U_{обр}$, В			
$I_{обр}$, мкА			
Экспериментальные данные			
$U_{пр}$, В, при $I_{пр} = I_{пр. макс}$	$T_1 =$		
	$T_2 =$		
$I_{обр}$, мкА, при $U_{обр} = U_{обр. макс}$	$T_1 =$		
	$T_2 =$		
$r_{диф}$, Ом	$I_{пр} = I_{пр. макс}$		
	$I_{пр} = 0,5 \cdot I_{пр. макс}$		
	$I_{пр} = 0,1 \cdot I_{пр. макс}$		
Расчетные данные			
$r_{диф} = 25/I_{пр}$, Ом $I_{пр} = I_{пр. макс}$ $I_{пр} = 0,5 \cdot I_{пр. макс}$ $I_{пр} = 0,1 \cdot I_{пр. макс}$			
$R_{пр} = U_{пр}/I_{пр}$, Ом	$I_{пр} = 0,5 \cdot I_{пр. макс}$		
	$I_{пр} = 0,1 \cdot I_{пр. макс}$		
	$I_{пр} = 0,1 \cdot I_{пр. макс}$		
$R_{обр} = U_{обр}/I_{обр}$, кОм	$T_1 =$		
	$T_2 =$		

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Формулировку цели исследования;
2. Типовые параметры исследуемых диодов;
3. Схемы для экспериментальных исследований;
4. Таблицы экспериментальных данных;
5. Графики вольтамперных характеристик исследуемых диодов при комнатной и повышенной температурах;
6. График теоретической ВАХ германиевого диода;
7. Расчет параметров исследованных диодов.

8. Сводную таблицу со справочными, экспериментальными и расчетными данными;
9. Анализ полученных результатов.

1.6. Контрольные вопросы

1. Какой полупроводник называется собственным?
2. Какой полупроводник называется примесным?
3. Что такое «энергия (уровень) Ферми»?
4. Укажите и поясните расположение уровня Ферми для собственного полупроводника, примесных полупроводников p - и n -типов.
5. Как зависит положение уровня Ферми примесных полупроводников от концентрации примеси и температуры?
6. Как связаны концентрации основных и неосновных носителей заряда в полупроводнике n -типа?
7. Что такое «равновесная концентрация электронов и дырок» и как она зависит от материала полупроводника, температуры?
8. Как зависит концентрация основных и неосновных носителей заряда от степени легирования и температуры?
9. Объясните механизм образования p - n -перехода.
10. Нарисуйте распределение объемных и подвижных зарядов, напряженности электрического поля и потенциала в области несимметричного p - n -перехода в равновесном состоянии.
11. В чем заключаются условия равновесия p - n -перехода?
12. Что такое «контактная разность потенциалов» и от чего она зависит?
13. Нарисуйте энергетическую диаграмму несимметричного p - n -перехода в равновесном состоянии.
14. Нарисуйте энергетическую диаграмму прямосмещенного p - n -перехода.
15. Как зависит ширина p - n -перехода от концентрации примеси и от приложенного напряжения?
16. Что такое «инжекция носителей заряда»?
17. Нарисуйте энергетическую диаграмму обратносмещенного p - n -перехода.
18. Что такое «экстракция носителей заряда»?
19. Запишите выражение для вольтамперной характеристики идеального p - n -перехода.

20. Нарисуйте вольтамперные характеристики германиевого, кремниевое и арсенид-галлиевого переходов и объясните их отличие.
21. Объясните влияние температуры на ход вольтамперной характеристики p - n -перехода.
22. Как влияет сопротивление базы на ход прямой ветви характеристики p - n -перехода?
23. Как зависит величина обратного тока p - n -перехода от концентрации примеси и температуры?
24. Объясните зависимость обратного тока в реальных p - n -переходах от величины обратного напряжения.

2. ВИДЫ ПРОБОЕВ p - n -ПЕРЕХОДА

2.1. Общая характеристика пробоя p - n -перехода

Обратное напряжение, приложенное к диоду, падает на выпрямляющем электрическом переходе (p - n -переход) диода. При больших обратных напряжениях происходит пробой p - n -перехода. **Пробой p - n -перехода** — это явление резкого уменьшения дифференциального сопротивления p - n -перехода, сопровождающееся резким увеличением обратного тока, при достижении обратным напряжением критического для данного прибора значения.

Пробой приводит к выходу p - n -перехода из строя лишь в том случае, когда возникает чрезмерный разогрев перехода и происходят необратимые изменения его структуры. Если же мощность, выделяющаяся в p - n -переходе, не превышает максимально допустимой, он сохраняет работоспособность и после пробоя. Поэтому для некоторых типов диодов пробой является основным рабочим режимом.

Напряжение, при котором наступает пробой перехода, зависит от типа p - n -перехода и может иметь величину от единиц до сотен вольт.

В зависимости от физических явлений, приводящих к пробую, различают тепловой, лавинный и полевой пробой. Два последних вида пробоя p - n -перехода относятся к электрическому пробую. Резкий рост обратного тока p - n -перехода в режиме пробоя происходит за счет увеличения числа носителей заряда в переходе. При тепловом пробое число носителей заряда в переходе возрастает за счет термической ионизации атомов, при электрическом пробое — под действием сильного электрического поля и ударной ионизации атомов решетки.

2.2. Тепловой пробой p - n -перехода

Тепловой пробой характерен для широких p - n -переходов, у которых база слабо легирована примесями. Данный тип пробоя обусловлен разогревом p - n -перехода при протекании через него обратного тока. В режиме постоянного тока мощность, выделяемая в p - n -переходе, определяется соотношением:

$$P_{\text{выд}} = I_{\text{обр}} U_{\text{обр}}. \quad (15)$$

Отводимая от p - n -перехода мощность в результате теплопроводности и дальнейшего рассеяния теплоты в окружающую среду пропорциональна перегреву p - n -перехода ($T_{\text{п}} - T_{\text{окр}}$) и обратно пропорциональна тепловому сопротивлению конструкции диода R_T :

$$P_{\text{отв}} = \frac{T_{\text{п}} - T_{\text{окр}}}{R_T}. \quad (16)$$

В установившемся режиме мощность, выделяющаяся на p - n -переходе, и мощность, отводимая от него, должны быть равны:

$$P_{\text{выд}} = P_{\text{отв}}. \quad (17)$$

Если количество тепла, выделяемого на p - n -переходе, превышает количество тепла, отводимого от p - n -перехода, то температура перехода начинает расти и возникает тепловой пробой.

Вид обратной ветви вольтамперной характеристики p - n -перехода с тепловым пробоем представлен на рис. 14.

В точке A обратное напряжение на p - n -переходе достигает значения напряжения теплового пробоя $U_{\text{пр1}}$, при котором начинается быстрый рост $I_{\text{обр}}$. ВАХ p - n -перехода с тепловым пробоем имеет участок AB , на котором дифференциальное сопротивление отрицательно:

$$r_{\text{диф}} = dU_{\text{обр}}/dI_{\text{обр}} < 0,$$

так как концентрация носителей заряда резко увеличивается и электрическое сопротивление перехода уменьшается относительно быстрее, чем растет ток.

Зависимость 1 (рис. 14) приведена для температуры окружающей среды $T_1 = +20^\circ\text{C}$, тепловой пробой наступает при напряжении равном $U_{\text{проб1}}$. Если температура окружающей среды возрастет до значения $T_2 = +40^\circ\text{C}$, то обратная ветвь ВАХ p - n -перехода принимает вид

зависимости 2 (рис. 14). Температурный коэффициент напряжения для теплового пробоя имеет отрицательное значение:

$$\text{ТКН}_{\text{ТЕПЛ}} = \Delta U_{\text{ПРОБ}} / \Delta T < 0, \quad (18)$$

где $\Delta U_{\text{ПРОБ}} = U_{\text{ПРОБ2}} - U_{\text{ПРОБ1}}$ изменение напряжения пробоя при изменении температуры на величину $\Delta T = T_2 - T_1$.

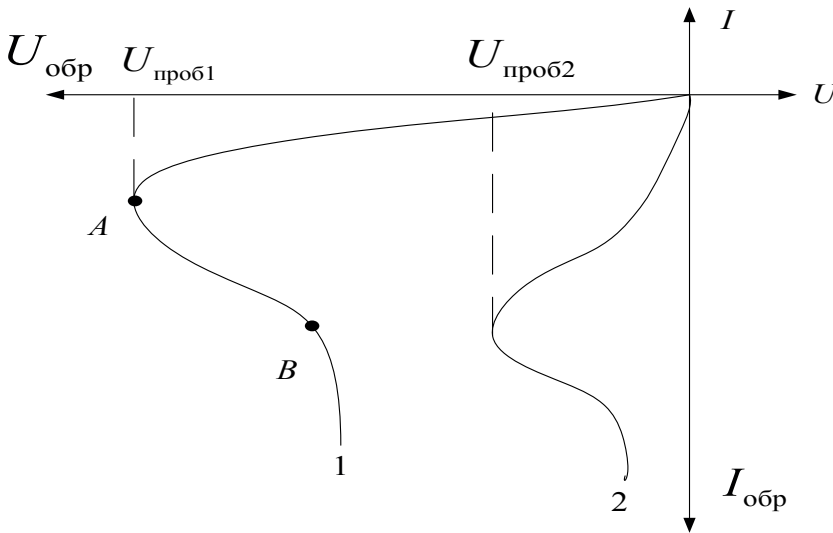


Рис. 14. Обратная ветвь ВАХ p - n -перехода с тепловым пробоем

2.3. Полевой пробой

Полевой, или туннельный, пробой относится к электрическому виду пробоя и характерен для сравнительно узких p - n -переходов (ширина p - n -перехода в равновесном состоянии составляет сотые доли микрометра).

Это обеспечивается в том случае, когда обе области p - n -перехода имеют высокую степень легирования примесями. При этом длина свободного пробега λ электронов меньше ширины обратнo-смещенного p - n -перехода:

$$\lambda < l_{\text{ОБР}}.$$

При напряженности электрического поля $E = U_{\text{обр}}/l_{\text{обр}}$ в p - n -переходе равной критическому значению $E_{\text{кр}} = (2-4) \cdot 10^5$ В/см, происходит полевой, или туннельный, пробой.

При такой большой напряженности электрического поля у атома полупроводника происходит отрыв валентных электронов, и число носителей заряда растет. С точки зрения энергетической (зонной) диаграммы, основу полевого пробоя составляет туннельный эффект — явление «просачивания» электронов сквозь узкий энергетический барьер p - n -перехода, т. е. переход электронов с занятых энергетических уровней валентной зоны полупроводника p -типа на свободные энергетические уровни зоны проводимости полупроводника n -типа. Эти переходы происходят без изменения энергии электрона, а на энергетической диаграмме, изображенной для этого случая на рис. 15, переходы происходят на одном энергетическом уровне, т. е. горизонтально.

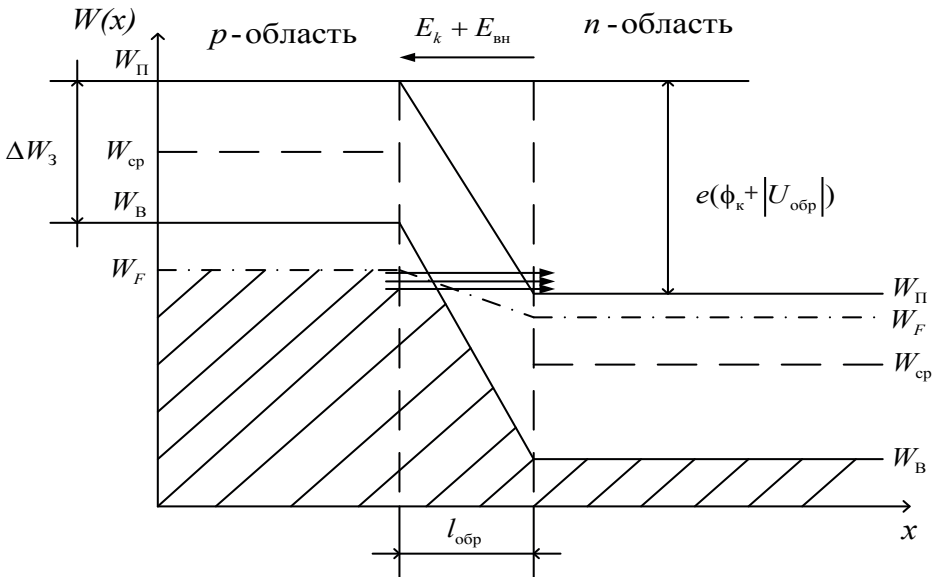


Рис. 15. Энергетическая диаграмма p - n -перехода при полевоом пробое

Вероятность туннельных переходов при напряженности электрического поля $E = 10^5$ В/см составляет один электрон в секунду, а при напряженности электрического поля $E = 10^6$ В/см — 10^{12} электронов в секунду. Поэтому при критическом значении напряженности электрического поля обратно-смещенного p - n -перехода количество туннельных переходов будет значительным, а это приводит к резкому

увеличению обратного тока. При дальнейшем увеличении обратного напряжения на p - n -переходе $U_{\text{обр}} > U_{\text{проб}}$ рост обратного тока происходит по экспоненциальному закону. Это объясняется увеличением напряженности электрического поля и степени перекрытия валентной зоны полупроводника p -типа и зоны проводимости полупроводника n -типа. Обратная ветвь ВАХ p - n -перехода для случая полевого пробоя представлена на рис. 16.

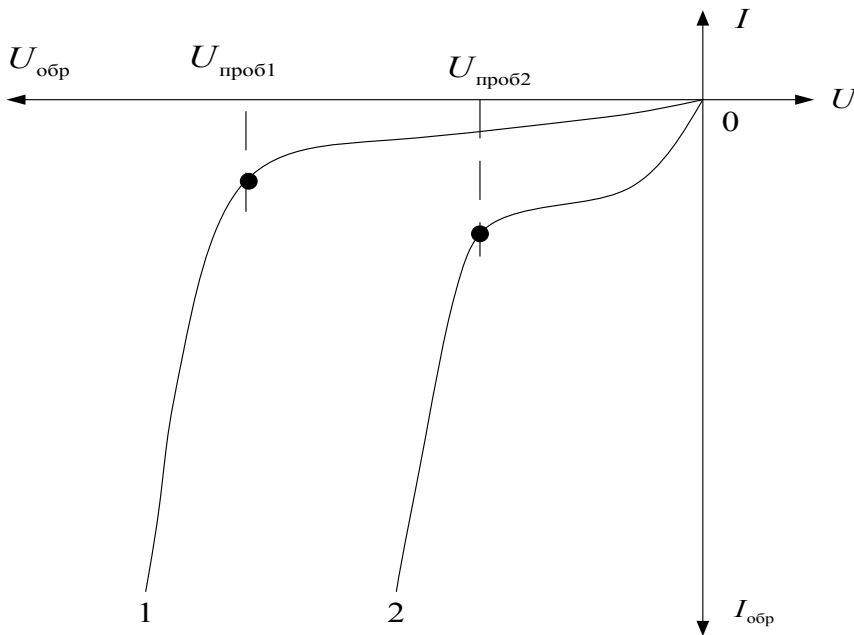


Рис. 16. Обратная ветвь ВАХ p - n -перехода при полевоом пробое

Зависимость 1 (рис. 16) изображена для значения температуры окружающей среды $T_1 = +20^\circ\text{C}$. При увеличении температуры окружающей среды до значения $T_2 = +50^\circ\text{C}$ ВАХ p - n -перехода видоизменяется — на рис. 16 это изменение нашло отражение в зависимости 2. При увеличении температуры обратный ток p - n -перехода возрастает в связи с ростом концентрации неосновных носителей заряда по экспоненциальному закону. Такое изменение обратного тока наблюдается при регулировании обратного напряжения в диапазоне от нуля до напряжения пробоя.

С увеличением температуры напряжение пробоя уменьшается и становится равным $U_{\text{проб2}}$ (зависимость 2 на рис. 16). Это обусловлено

тем, что при увеличении температуры возрастает амплитуда тепловых колебаний атомов полупроводника в узлах кристаллической решетки, энергия электронов также растет, величина контактной разности потенциалов p - n -перехода ϕ_k снижается, ширина p - n -перехода $l_{\text{ОБР}}$ уменьшается, а напряженность электрического поля в p - n -переходе E увеличивается, критическое значение напряженности поля $E_{\text{кр}}$ достигается при меньшем значении $U_{\text{ОБР}}$, растет количество туннельных переходов, и следовательно, резко возрастает обратный ток. Следовательно, температурный коэффициент напряжения при полевом пробое имеет отрицательное значение:

$$\text{ТКН}_{\text{пол}} = \Delta U_{\text{проб}} / \Delta T < 0, \quad (19)$$

где $\Delta U_{\text{проб}} = U_{\text{проб2}} - U_{\text{проб1}}$ изменение напряжения пробоя при изменении температуры на величину $\Delta T = T_2 - T_1$.

При полевом пробое пробивное напряжение оказывается обратно пропорциональным концентрации примесей в областях, прилегающих к p - n -переходу, или прямо пропорциональным удельному сопротивлению этих областей.

2.4. Лавинный пробой

Лавинный пробой относится к электрическому виду пробоя и проявляется в p - n -переходах средней величины, то есть ширина p - n -перехода достаточна большая. При увеличении значения обратного напряжения на p - n -переходе напряженность электрического поля $E = U_{\text{ОБР}} / l_{\text{ОБР}}$ (В/см) растет.

Когда напряженность электрического поля достигает критического значения $E_{\text{кр}} = (80-120)$ кВ/см, то создаются условия для ударной ионизации нейтральных атомов полупроводника непосредственно в p - n -переходе быстрыми электронами или дырками, которые получили достаточное ускорение за счет действия напряженности электрического поля p - n -перехода.

В результате ударной ионизации генерируются новые пары носителей заряда, которые, в свою очередь ускоряясь под действием напряженности электрического поля, вновь при столкновении с нейтральными атомами полупроводника образуют новые электронно-дырочные пары. Ионизацию нейтральных атомов совершают только те электроны и дырки, которые на длине свободного пробега электрона на-

бирают за счет напряженности электрического поля энергию, достаточную для ионизации. Поэтому ширина p - n -перехода должна быть достаточно большая, а именно много больше длины свободного пробега электрона: $l_{\text{обп}} \gg l$.

С ростом $U_{\text{обп}}$ увеличиваются ширина p - n -перехода и напряженность электрического поля в нем, электроны разгоняются сильнее, резко возрастает число ионизаций, совершаемых каждым электроном, и ток p - n -перехода лавинообразно растет.

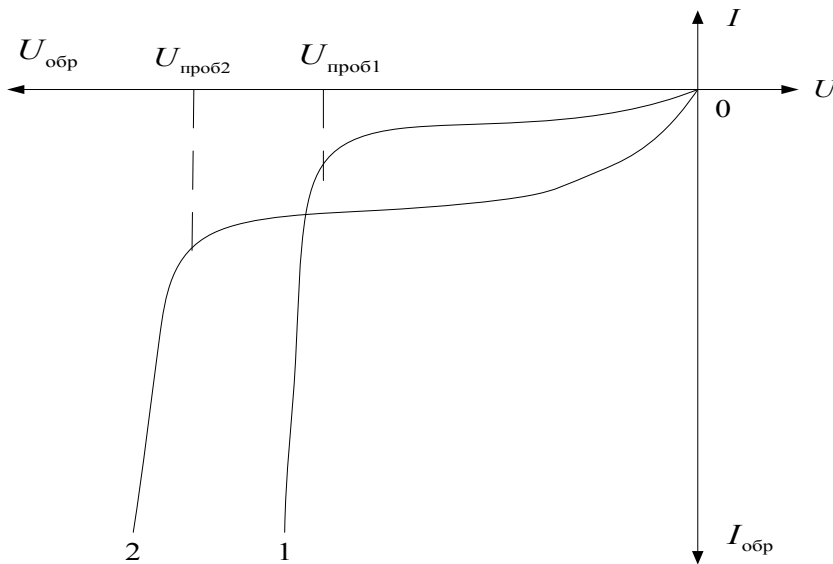


Рис. 17. Обратная ветвь ВАХ p - n -перехода с лавинным пробоем

Напряжение лавинного пробоя определяется из соотношения:

$$U_{\text{проб}} = A \cdot \rho_6^B, \quad (20)$$

где ρ_6 — удельное электрическое сопротивление базы диода; A , B — коэффициенты, зависящие от материала и типа электропроводности полупроводника. Обратная ветвь ВАХ p - n -перехода с лавинным пробоем представлена на рис. 17.

Зависимость 1 (рис. 17) соответствует температуре окружающей среды $T_1 = +20^\circ\text{C}$. С увеличением температуры окружающей среды лавинный пробой наступает при большем напряжении ($|U_{\text{проб2}}| > |U_{\text{проб1}}|$). Это объясняется тем, что с ростом температуры увеличивается амплитуда колебаний атомов кристаллической решетки полупроводника

и уменьшается длина свободного пробега носителей заряда λ , а значит, и энергия, которую носитель заряда может приобрести на длине свободного пробега в электрическом поле. Поэтому для получения энергии, необходимой для ударной ионизации нейтральных атомов, требуется большая напряженность электрического поля в p - n -переходе, и следовательно, напряжение лавинного пробоя возрастает.

С другой стороны, при увеличении температуры уменьшается подвижность носителей заряда полупроводника, растет удельное электрическое сопротивление базы p - n -перехода, а в соответствии с соотношением

$$U_{\text{проб}} \sim \rho_b, \quad (21)$$

напряжение лавинного пробоя также возрастает.

На рис. 17 зависимость 2 изображена для температуры окружающей среды $T_2 = +50^\circ\text{C}$. Таким образом, температурный коэффициент напряжения при лавинном пробое имеет положительное значение:

$$\text{ТКН}_{\text{ЛАВ}} = \Delta U_{\text{проб}} / \Delta T > 0, \quad (22)$$

где $\Delta U_{\text{проб}} = U_{\text{проб}2} - U_{\text{проб}1}$, изменение напряжения пробоя при изменении температуры на величину ΔT .

Лавинный пробой характерен для p - n -переходов с напряжением пробоя более 7 В.

2.5. Параметры стабилитронов

Основным параметром стабилитрона является напряжение стабилизации $U_{\text{ст}}$ — значение напряжения на стабилитроне при протекании заданного (номинального) тока стабилизации.

Промышленность выпускает стабилитроны с различными $U_{\text{ст}}$ от 0,7 до 180 В. Большинство стабилитронов работает на принципе лавинного пробоя. Пробивное напряжение диода, а значит, напряжение стабилизации стабилитрона, зависит от толщины p - n -перехода или удельного сопротивления базы: $U_{\text{з.лав}} = A \rho_b^B$.

Чем больше легирована примесями база диода, тем меньше ее удельное сопротивление, уже p - n -переход и выше в нем напряженность электрического поля, тем низковольтнее получается стабилитрон.

Максимально допустимая мощность рассеяния стабилитрона при комнатной температуре:

$$P_{\text{макс}} = I_{\text{ст. макс}} \cdot U_{\text{ст.}}$$

Если превысить $P_{\text{макс}}$, то электрический пробой может перейти в тепловой и привести к выходу из строя стабилитрона.

В зависимости от величины $P_{\text{макс}}$ стабилитроны делятся на три группы.

Стабилитроны малой мощности: $P_{\text{макс}} < 0,3$ Вт.

Стабилитроны средней мощности: $0,3 < P_{\text{макс}} < 5$ Вт.

Стабилитроны большой мощности: $5 < P_{\text{макс}} < 10$ Вт.

Функциональные возможности стабилитронов (напряжение стабилизации $U_{\text{ст}}$ и рассеиваемая мощность $P_{\text{макс}}$) указываются в третьем элементе маркировки (трехзначное число) и приведены в таблице 4. Причем напряжение стабилизации непосредственно указывается в маркировке второй и третьей цифрами.

Так, например, стабилитроны типа КС147, КС291 — малой мощности, с напряжением стабилизации соответственно 4,7 и 91 В. Стабилитроны типа КС447, КС512, КС680 — средней мощности, с $U_{\text{ст}}$ соответственно 4,7; 12,0; 180 В.

Таблица 4

Маркировка стабилитронов

$U_{\text{ст}}, \text{В}$ $P_{\text{макс}}, \text{Вт}$	0,1–9,9	10–99	100–199
< 0,3	101–199	210–299	301–399
0,3–5	401–499	510–599	601–699
>5	701–799	810–899	901–999

Важными параметрами стабилитронов являются минимальный и максимальный токи стабилизации — $I_{\text{ст. мин}}$ и $I_{\text{ст. макс}}$ (рис. 18). Эти токи ограничивают область вольтамперной характеристики стабилитрона, в которой стабилитрон может выполнять функции стабилизации напряжения при условии обеспечения заданной надежной работы прибора.

Началу рабочего участка характеристик соответствует точка А, ток в которой равен $I_{\text{ст. мин}}$. Минимальный ток стабилизации определяется тем, что при меньших значениях тока, во-первых, дифференциальное сопротивление оказывается еще большим и, во-вторых, в стабилитро-

нах с лавинным пробоем из-за неустойчивости процесса ударной ионизации возникают шумы.

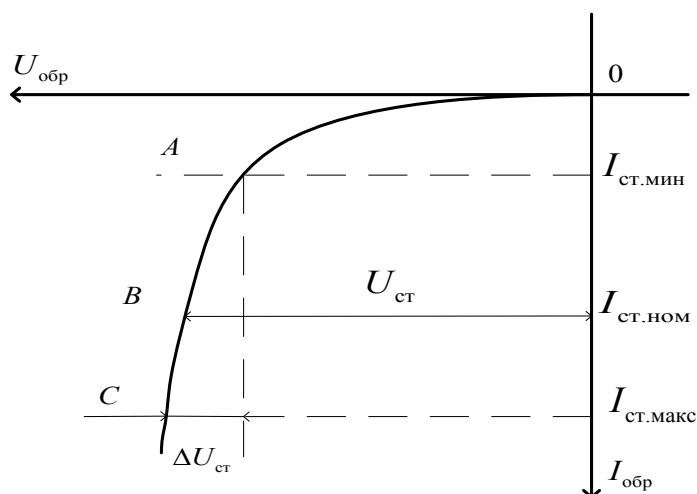


Рис. 18. Вольтамперная характеристика стабилитрона

С увеличением тока, протекающего через стабилитрон, процесс ударной ионизации атомов устанавливается и шумы исчезают. Величина $I_{\text{ст.мин}}$ у маломощных стабилитронов лежит в пределах 1–5 мА.

Конец рабочего участка характеристики (точка C) соответствует току $I_{\text{ст.макс}}$, величина которого ограничивается максимально допустимой мощностью рассеяния $P_{\text{макс}}$, а именно:

$$I_{\text{ст.макс}} = P_{\text{макс}} / U_{\text{ст}}.$$

Величина $I_{\text{ст.макс}}$ у различных стабилитронов может находиться в пределах от 10 мА до 2 А.

Дифференциальное сопротивление стабилитрона $r_{\text{ст}}$:

$$r_{\text{ст}} = dU_{\text{ст}} / dI_{\text{ст}},$$

которое обычно невелико. В рабочей точке, соответствующей $I_{\text{ст.ном}}$, оно колеблется от долей Ома до нескольких десятков Ом в зависимости от типа стабилитрона. При уменьшении тока стабилизации ниже $I_{\text{ст.мин}}$ дифференциальное сопротивление резко возрастает. Поэтому использование стабилитронов при токах меньше $I_{\text{ст.мин}}$ нежелательно.

По значению дифференциального сопротивления стабилитрона можно судить о качестве стабилитрона. Так как определенным изменениям тока для лучшей стабилизации должны соответствовать мини-

мальные изменения напряжения, то качество стабилитрона тем выше, чем меньше его дифференциальное сопротивление.

Статическое сопротивление или сопротивление стабилитрона постоянному току в рабочей точке:

$$R_{\text{стат}} = U_{\text{ст}} / I_{\text{ст.ном.}}$$

Добротность стабилитрона:

$$Q_{\text{ст}} = R_{\text{стат}} / r_{\text{ст}} > 50.$$

Чем больше статическое сопротивление и меньше дифференциальное, тем лучше стабилизирующее действие прибора.

Для оценки влияния изменения температуры окружающей среды на напряжение стабилизации вводится температурный коэффициент напряжения стабилизации (ТКН)

$$\alpha_{\text{ст}} = (\Delta U_{\text{ст}}' / U_{\text{ст}} \cdot \Delta T) \cdot 100; [\% / ^\circ\text{C}],$$

где $\Delta U_{\text{ст}}'$ — отклонение напряжения $U_{\text{ст}}$ от номинального при изменении окружающей температуры в интервале ΔT . Температурный коэффициент напряжения стабилизации $\alpha_{\text{ст}}$ — величина, определяемая отношением относительного изменения напряжения стабилизации к абсолютному изменению температуры окружающей среды при постоянном токе стабилизации. Величина и знак $\alpha_{\text{ст}}$ зависят от напряжения стабилизации. Типичный график этой зависимости приведен на рис. 19.

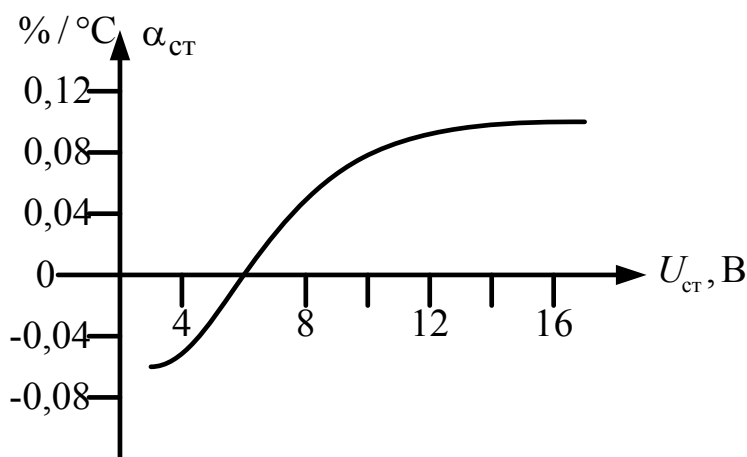


Рис. 19. Зависимость температурного коэффициента напряжения стабилизации от величины напряжения стабилизации

Как видно из рисунка, $\alpha_{\text{ст}}$ может иметь положительные значения для относительно высоковольтных и отрицательные для низковольтных стабилитронов, что связано с различной температурной зависимостью пробивного напряжения при лавинном и туннельном пробое p - n -перехода. Изменение знака $\alpha_{\text{ст}}$ соответствует напряжению стабилизации $U_{\text{ст}} \approx 6$ В.

Как отмечалось выше, стабилитроны с напряжением стабилизации $U_{\text{ст}}$ больше 7 В работают на принципе лавинного пробоя и имеют положительный ТКН обратной ветви характеристики. Для компенсации температурного дрейфа напряжения стабилизации прибегают к включению последовательно с основным стабилитроном одного или нескольких стабилитронов, p - n -переходы которых включены в прямом направлении и имеют отрицательный ТКН. В такой цепи суммарный температурный коэффициент напряжения может быть сведен практически к нулю.

Так, в прецизионных стабилитронах типа Д818 и КС191 используются три последовательно соединенных p - n -перехода, размещенных в корпусе прибора. Один из них — стабилизирующий, включен в обратном направлении, два других — термокомпенсирующие и включены в прямом направлении. У таких термокомпенсирующих стабилитронов температурный коэффициент напряжения стабилизации чрезвычайно мал и лежит в пределах $\alpha_{\text{ст}} = 0,02\text{--}0,0005\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

2.6. Параметрический стабилизатор напряжения

Стабилитроны применяются как стабилизирующие элементы в стабилизаторах напряжения, в качестве источников опорного напряжения в электронных стабилизаторах напряжения, как элементы согласования уровней потенциала в цепях межкаскадной связи усилителей постоянного тока, в устройствах защиты элементов электрических цепей от перегрузок и т. д.

Рассмотрим работу простейшего стабилизатора напряжения. На рис. 20 приведена схема однокаскадного параметрического стабилизатора постоянного напряжения. Стабилитрон VD включен в обратном направлении параллельно нагрузке R_n . На балластном резисторе R_b гасится избыточное входное напряжение $U_{\text{вх}}$. Величина R_b определяет исходное положение рабочей точки на вольтамперной характеристике стабилитрона.

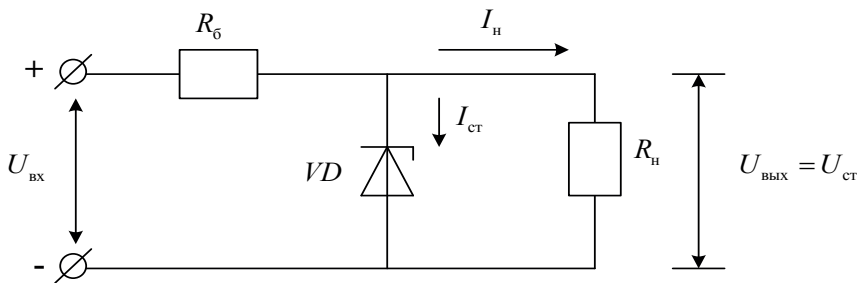


Рис. 20. Схема параметрического стабилизатора напряжения

Величина балластного сопротивления R_6 определяется по формуле

$$R_6 = (U_{\text{вх}} - U_{\text{ст}}) / (I_{\text{ст}} + I_{\text{н}}),$$

где $I_{\text{н}}$ — ток нагрузки, а $I_{\text{ст}}$ — ток стабилитрона.

Если исходную рабочую точку выбираем в середине рабочего участка ВАХ стабилитрона, то ток стабилитрона $I_{\text{ст}}$ определяем по формуле

$$I_{\text{ст}} = (I_{\text{ст.макс}} + I_{\text{ст.мин}}) / 2.$$

Стабилизатор напряжения стабилизирует выходное напряжение как при изменении входного напряжения $U_{\text{вх}}$, так и при изменении тока нагрузки $I_{\text{н}}$. Принцип действия стабилизатора следующий. Допустим, что напряжение на входе стабилизатора увеличивается, в результате чего увеличивается ток стабилитрона, а это вызывает увеличение падения напряжения на балластном сопротивлении R_6 настолько, на сколько возросло входное напряжение. Напряжение на нагрузке стабилизатора остается при этом почти неизменным. Если ток, потребляемый нагрузкой, увеличился, то при этом ток стабилитрона должен уменьшиться примерно на такую же величину, а выходное напряжение стабилизатора остается практически постоянным.

Одним из основных показателей работы стабилизатора напряжения является коэффициент стабилизации $K_{\text{ст}}$, который показывает, во сколько раз относительное изменение напряжения на выходе стабилизатора меньше его относительного изменения на входе.

Коэффициент стабилизации определяется по формуле

$$K_{\text{ст}} = (\Delta U_{\text{вх}} \cdot U_{\text{ст}}) / (\Delta U_{\text{ст}} \cdot U_{\text{вх}}) = (R_6 + r_{\text{ст}}) \cdot U_{\text{ст}} / (r_{\text{ст}} \cdot U_{\text{вх}}),$$

где $\Delta U_{\text{вх}}$, $\Delta U_{\text{вых}} = \Delta U_{\text{ст}}$ — приращения входного и выходного напряжений при постоянном токе нагрузки, $U_{\text{вх}}$, $U_{\text{ст}}$ — номинальные значения входного и выходного напряжения стабилизатора.

Величины напряжений и их изменений, необходимых для определения $K_{\text{ст}}$, находят по основной характеристике стабилизатора

$$U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}}),$$

сняваемой при постоянном токе нагрузки.

Из выражения для определения $K_{\text{ст}}$ видно, что величина коэффициента стабилизации тем выше, чем меньше дифференциальное сопротивление стабилизатора $r_{\text{ст}}$. При увеличении балластного сопротивления $R_{\text{б}}$ коэффициент стабилизации также растет, но при этом снижается коэффициент полезного действия стабилизатора и увеличивается входное напряжение.

Для увеличения коэффициента стабилизации применяется каскадное (последовательное) соединение стабилизаторов. Однако недостатками таких стабилизаторов являются низкий коэффициент полезного действия, усложнение схемы стабилизатора, значительное увеличение входного напряжения.

2.7. Лабораторное задание № 2

«Исследование характеристик и параметров стабилизаторов»

Цель работы

Исследовать влияние материала полупроводника и температуры окружающей среды на характеристики и параметры полупроводниковых стабилизаторов.

1. Записать параметры типового режима исследуемых стабилизаторов (табл. П.3, П.4 или [18–20]).

2. Определить величину сопротивления $R_{\text{б}}$ по формуле

$$R_{\text{б}} = \frac{U_{\text{вх. макс}} - U_{\text{ст. ном}}}{I_{\text{ст. макс}}}, \quad (23)$$

где $U_{\text{вх. макс}}$ — максимальное значение напряжения получаемого от источника, $U_{\text{ст. ном}}$ — напряжение стабилизации (справочный параметр),

$I_{\text{ст. макс}}$ — максимальное значение тока стабилизации (справочный параметр).

3. Собрать схему для снятия прямой ветви ВАХ перехода, для этого использовать источник входного напряжения (рис. 21).

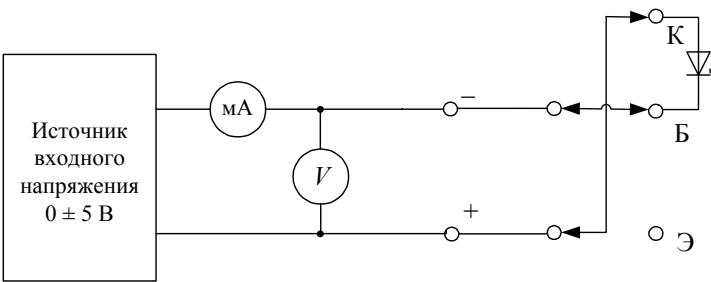


Рис. 21. Схема лабораторной установки для снятия прямой ветви ВАХ стабилитрона

4. Снять прямую ветвь ВАХ перехода $U_{\text{ПРЯМ}} = f(I_{\text{ПРЯМ}})$, изменяя прямой ток в пределах от 0 до 50 мА.

Таблица 5

Справочные и расчетные данные исследованных стабилитронов

Тип стабилитронов			
Параметры			
Справочные данные			
$I_{\text{пр}}$, мА			
$U_{\text{пр}}$, В			
$U_{\text{обр}}$, В			
$I_{\text{обр}}$, мкА			
Экспериментальные данные			
$U_{\text{пр}}$, В, при $I_{\text{пр}} = I_{\text{пр. макс}}$	$T1 =$		
	$T2 =$		
$I_{\text{обр}}$, мкА, при $U_{\text{обр}} = U_{\text{обр. макс}}$	$T1 =$		
	$T2 =$		
$r_{\text{диф}}$, Ом	$I_{\text{пр}} = I_{\text{пр. макс}}$		
	$I_{\text{пр}} = 0,5 \cdot I_{\text{пр. макс}}$		
	$I_{\text{пр}} = 0,1 \cdot I_{\text{пр. макс}}$		
Расчетные данные			
$r_{\text{диф}} = 25 / I_{\text{пр}}$, Ом			
$I_{\text{пр}} = I_{\text{пр. макс}}$			
$I_{\text{пр}} = 0,5 \cdot I_{\text{пр. макс}}$			
$I_{\text{пр}} = 0,1 \cdot I_{\text{пр. макс}}$			
$R_{\text{пр}} = U_{\text{пр}} / I_{\text{пр}}$, Ом	$I_{\text{пр}} = I_{\text{пр. макс}}$		
	$I_{\text{пр}} = 0,5 \cdot I_{\text{пр. макс}}$		
	$I_{\text{пр}} = 0,1 \cdot I_{\text{пр. макс}}$		
$R_{\text{обр}} = U_{\text{обр}} / I_{\text{обр}}$, кОм	$T1 =$		
	$T2 =$		

5. Собрать схему для снятия обратной ветви вольтамперной характеристики стабилитрона (рис. 22). Для этого необходимо подключить к соответствующим гнездам стенда переменный резистор R_B и цифровой вольтметр ($V1$) для измерения напряжения стабилизации U_{CT} .

6. Подготовить схему лабораторной установки для работы, для чего установить регулятор переменного резистора R_B в положение, соответствующее максимальному значению сопротивления. Включить тумблер в положение «сеть» и переключателями « $U_{ВЫХ}$ » «грубо» и «точно» установить напряжение выходного источника $U_{ВЫХ} = 25$ В. Плавно уменьшая величину сопротивления R_B , выставить на миллиамперметре значение $I_{CT. МАКС}$ исследуемого стабилитрона. Цифровым прибором типа $M-890D$ или $M-833$ или $B7-20$ измерить величину сопротивления R_B .

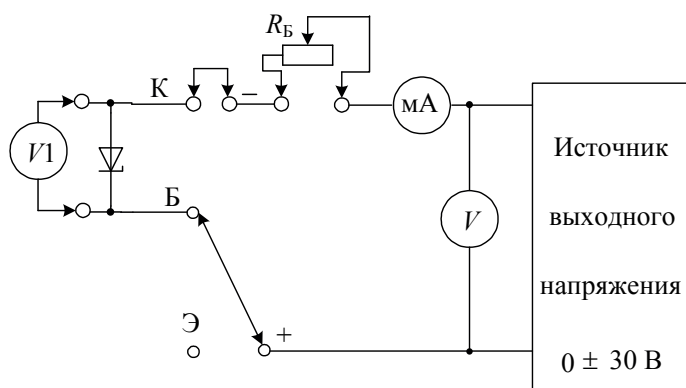


Рис. 22. Схема лабораторной установки для снятия обратной ветви ВАХ стабилитрона

7. Снять зависимость $U_{CT} = f(I_{CT})$ при комнатной температуре. При снятии обратной ветви вольтамперной характеристики стабилитрона, работающего в режиме электрического пробоя, удобнее задавать ток и отмечать при этом напряжение стабилизации U_{CT} . Ток стабилитрона изменять в пределах от 0 до $I_{CT. МАКС}$. Результаты измерения свести в таблицу 6.

8. Исследуемый переход поместить в термостат, предварительно разогретый до температуры 70°C . Через 5 минут повторить пункты 7 и 3, 4, 5.

Таблица 6

Пример оформления экспериментальных данных

$I_{\text{СТ}}, \text{мА}$	0,01	0,03	0,1	0,3	1	3	10	15	20	25	$I_{\text{СТ. МАКС}}$
$U_{\text{СТ}}, \text{В}$ $T = 20^\circ \text{C}$											
$U_{\text{СТ}}, \text{В}$ $T = 70^\circ \text{C}$											

9. Заменить один исследуемый стабилитрон на другой. Повторить пункты с 1 по 8.

Обработка результатов эксперимента

1. Для всех исследуемых стабилитронов, предназначенных для работы в режиме электрического пробоя, определить значения $I_{\text{СТ. МАКС}}$, $I_{\text{СТ. МИН}}$. Номинальный ток стабилизации перехода определить по формуле

$$I_{\text{СТ. НОМ}} = 1/2 \cdot (I_{\text{СТ. МАКС}} + I_{\text{СТ. МИН}}). \quad (24)$$

2. Для всех исследуемых стабилитронов, используя прямые ветви характеристик, снятые при комнатной и повышенной температурах, определить значения температурного коэффициента напряжения прямой ветви

$$\text{ТКН}_{\text{ПРЯМ}} = \frac{\Delta U_{\text{ПРЯМ}}}{\Delta T} \quad \text{при } I_{\text{ПРЯМ}} = I_{\text{СТ. НОМ}}. \quad (25)$$

3. Для всех исследуемых стабилитронов, используя обратные ветви вольтамперных характеристик, снятые при различных температурах, определить значение температурного коэффициента напряжения стабилизации

$$\text{ТКН}_{\text{СТ}} = \frac{\Delta U_{\text{СТ}}}{\Delta T} \quad \text{при } I_{\text{СТ}} = I_{\text{СТ. НОМ}}. \quad (26)$$

4. Для всех исследуемых стабилитронов по вольтамперным характеристикам, снятым при комнатной температуре, определить для номинального режима:

а) дифференциальное сопротивление обратносмещенного перехода в рабочей точке

$$r_{\text{СТ}} = \frac{\Delta U_{\text{СТ}}}{I_{\text{СТ. МАКС}} - I_{\text{СТ. МИН}}} , \quad (27)$$

где $\Delta U_{\text{СТ}}$ соответствует изменениям тока от $I_{\text{СТ. МАКС}}$ до $I_{\text{СТ. МИН}}$,

б) статическое сопротивление перехода $R_{\text{СТ}} = U_{\text{СТ. НОМ}}/I_{\text{СТ. НОМ}}$.

5. Для стабилитронов с различным механизмом пробоя определить сопротивление базы. Для этого рассчитать дифференциальное сопротивление перехода в области «больших» токов прямой ветви вольтамперной характеристики:

$$r_{\text{Б}} \approx r_{\text{ДИФ}} = \Delta U_{\text{ПРЯМ}}/\Delta I_{\text{ПРЯМ}} = (U_2 - U_1)/(I_2 - I_1), \quad (28)$$

где I_2 — максимальное измеренное значение прямого тока перехода, I_1 составляет примерно $0,8 \cdot I_2$, значения прямого напряжения U_2 , U_1 соответствуют значениям тока I_2 , I_1 .

Сравнить полученные значения.

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Формулировку цели исследования;
2. Типовые параметры исследуемых стабилитронов;
3. Схемы для экспериментальных исследований;
4. Таблицы экспериментальных данных;
5. Графики вольтамперных характеристик исследуемых стабилитронов при комнатной и повышенной температурах;
6. Расчет параметров исследованных стабилитронов;
7. Сводную таблицу со справочными, экспериментальными и расчетными данными;
8. Анализ полученных результатов.

2.8. Контрольные вопросы

1. Что такое «пробой»?
2. Назовите основные виды пробоев p - n -переходов.
3. Поясните механизм и условия возникновения теплового пробоя.
4. Как влияет температура окружающей среды на напряжение теплового пробоя?
5. Какие виды пробоев используются в стабилитронах?

6. Поясните механизм и условия возникновения лавинного пробоя.
7. Поясните механизм и условия возникновения полевого пробоя.
8. Как зависит величина напряжения стабилизации от степени легирования базы?
9. Почему в качестве материала для электронно-дырочных переходов, предназначенных для работы в режиме электрического пробоя, выбран кремний, а не германий?
10. Почему с ростом температуры напряжение стабилизации для переходов с лавинным пробоем увеличивается?
11. Почему с ростом температуры напряжение стабилизации для переходов с полевым пробоем уменьшается?
12. Нарисуйте схему для экспериментальных исследований. Поясните назначение элементов схемы и порядок экспериментальной работы.

3. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫХ ПЕРЕХОДАХ С ТУННЕЛЬНЫМ ЭФФЕКТОМ

3.1. Понятие и особенности электронно-дырочных переходов с туннельным эффектом

Туннельный эффект, или туннелирование, — это преодоление микрочастицей потенциального барьера в случае, когда ее полная энергия меньше высоты барьера [6].

Туннельный эффект — явление исключительно квантовой природы, невозможное в классической механике. При характеристике туннельного эффекта вводится понятие вероятности прохождения частицей сквозь потенциальный барьер. Эта вероятность тем больше, чем меньше масса частицы, чем уже потенциальный барьер и чем ближе энергия частиц к значению энергии потенциального барьера, причем туннельные переходы происходят без изменения энергии частиц.

Для электронно-дырочных переходов туннельный эффект наблюдается только при очень малой ширине p - n -перехода $l_0 \leq 10^{-6}$ см, т. е. в переходах между высоколегированными p^+ - и n^+ -областями ($N_d, N_A > 10^{18} \text{ см}^{-3}$) [1–5, 18].

Туннельный эффект проявляется путем просачивания электронов сквозь узкий энергетический (потенциальный) барьер p - n -перехода без изменения энергии. Причем ширина энергетиче-

ческого барьера меньше толщины обедненного слоя полупроводника l_0 .

Вероятность туннельных переходов в электронно-дырочном переходе зависит от напряженности электрического поля E и выражается количеством переходов электронов в единицу времени, электронов/сек:


$$P = N_{\text{эл}} / t, \quad (29)$$

где $N_{\text{эл}}$ — количество электронов, t — время.

При напряженности электрического поля $E = 10^5$ В/см значение $p = 1$ эл/с (один электрон в секунду), а при $E = 10^6$ В/см — $p = 10^{12}$ эл/с.

При внесении большой концентрации примесей N_A , $N_D = (10^{18} - 10^{20}) \text{ см}^{-3}$ в области полупроводников p - и n -типов происходит расщепление примесных энергетических уровней с образованием примесных энергетических зон, которые проникают в разрешенные зоны: зону проводимости полупроводника n -типа; валентную зону полупроводника p -типа. Энергетический уровень Ферми в этом случае располагается в разрешенных зонах «вырожденных» полупроводников.

Энергетическая диаграмма электронно-дырочного перехода на основе сильнолегированных примесных полупроводников в равновесном состоянии приведена на рис. 23.

На энергетической диаграмме обозначены: W_B — энергетический уровень потолка валентной зоны; W_P — энергетический уровень дна зоны проводимости; W_F — энергетический уровень Ферми; заштрихованы все энергетические уровни, занятые электронами;  — обозначены свободные энергетические уровни зоны проводимости.

Для энергетической диаграммы электронно-дырочного перехода (рис. 23) имеем

$$l_0 = \left[\frac{2\epsilon\epsilon_0\phi_K}{e} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \cong 10^{-6} \text{ см} = 10 \text{ нм}, \quad (30)$$

$$\Delta W_3 = e\Delta\phi_3, \quad (31)$$

$$\phi_K \cong \Delta\phi_3. \quad (32)$$

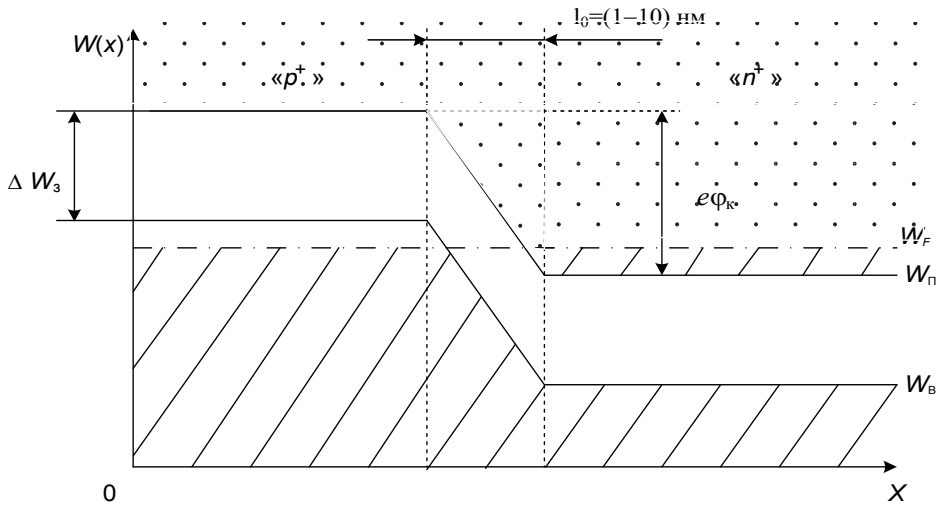


Рис. 23. Энергетическая диаграмма электронно-дырочного перехода с туннельным эффектом в равновесном состоянии

Например, для p - n -перехода на основе германия: $\phi_K = 0,65$ В, $l_0 = 10^{-6}$ см, $E_0 = \frac{\phi_K}{l_0} = \frac{0,65}{10^{-6}} = 0,65 \cdot 10^6$ В/см. При этом в электронно-ды-

рочном переходе вероятности туннельных переходов электронов из p -области в n -область и обратно одинаковы. Поэтому встречные потоки электронов равны, а суммарный туннельный ток через p - n -переход равен нулю:

$$I_T = I_{Tp} + I_{Tn} = 0, \quad (33)$$

где I_{Tp} — туннельный ток, образованный туннельными переходами электронов из полупроводника p -типа в полупроводник n -типа; I_{Tn} — туннельный ток, создаваемый туннельными переходами электронов из полупроводника n -типа в полупроводник p -типа.

В условиях равновесного состояния электронно-дырочного перехода изоэнергетические уровни (уровни с одинаковыми значениями энергии) по обе стороны перехода либо заняты, либо свободны с одинаковой вероятностью и туннельный ток в p - n -переходе равен нулю ($I_T = 0$).

В электронно-дырочном переходе, образованном сильнолегированными («вырожденными») примесными полупроводниками, имеют ме-

сто диффузионные и дрейфовые составляющие токов, как и в обычном p - n -переходе:

$$I_D = I_{Dp} + I_{Dn}; \quad (34)$$

$$I_E = I_{Ep} + I_{En}, \quad (35)$$

где I_{Dn} — электронная составляющая диффузионного тока; I_{Dp} — дырочная составляющая диффузионного тока; I_{En} — электронная составляющая дрейфового тока; I_{Ep} — дырочная составляющая дрейфового тока.

При этом концентрация основных носителей заряда в области p - n -перехода очень высока:

$$p_p \cong N_A \gg n_p, \quad n_n \cong N_D \gg p_n. \quad (36)$$

Диффузионная составляющая тока образуется движением основных носителей заряда в p - n -переходе, и она будет небольшой в силу значительной величины потенциального барьера, определяемой контактной разностью потенциалов:

$$\phi_K = \phi_T \cdot \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}, \quad (37)$$

где ϕ_K — контактная разность потенциалов; $\phi_T = \frac{kT}{e}$ — температурный потенциал; N_A — концентрация акцепторов в полупроводнике p -типа; N_D — концентрация доноров в полупроводнике n -типа; n_i — концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике. Для сильнолегированных примесных полупроводников имеет место большое значение N_A , N_D , поэтому в p - n -переходе на основе данных примесных полупроводников получают высокое значение контактной разности потенциалов ϕ_K .

Значение дрейфовой составляющей тока p - n -перехода в данном случае невелико, так как мала концентрация неосновных носителей заряда в обеих областях p - n -перехода. Условие равновесия электронно-дырочного перехода в общем виде запишется:

$$I_D + I_E + I_T = 0, \quad (38)$$

или

$$I_{Dn} + I_{Dp} + I_{En} + I_{Ep} + I_{Tn} + I_{Tp} = 0. \quad (39)$$

3.2. Вольтамперная характеристика идеального электронно-дырочного перехода с туннельным эффектом

При подаче внешнего напряжения на электронно-дырочный переход, принцип работы которого основан на явлении туннельного эффекта, получают вольтамперную характеристику, представленную на рис. 24.

На рис. 24 пунктирной линией показана вольтамперная характеристика электронно-дырочного перехода без учета туннельной составляющей тока.

Рассмотрим вольтамперную характеристику идеального p - n -перехода при наличии туннельного эффекта (рис. 24) с помощью энергетических (зонных) диаграмм. Для точки 0 ВАХ (рис. 24) при условии равновесия электронно-дырочного перехода энергетическая диаграмма изображена на рис. 23. Ее анализ показал, что полный ток через электронно-дырочный переход в этом случае равен нулю.

Для точки A (рис. 24) при небольшом значении прямого напряжения $U_{\Pi} > U_{\Pi p1} > 0$ в p - n -переходе происходят уменьшение высоты потенциального барьера и смещение энергетических уровней n -области относительно энергетических уровней p -области (рис. 25).

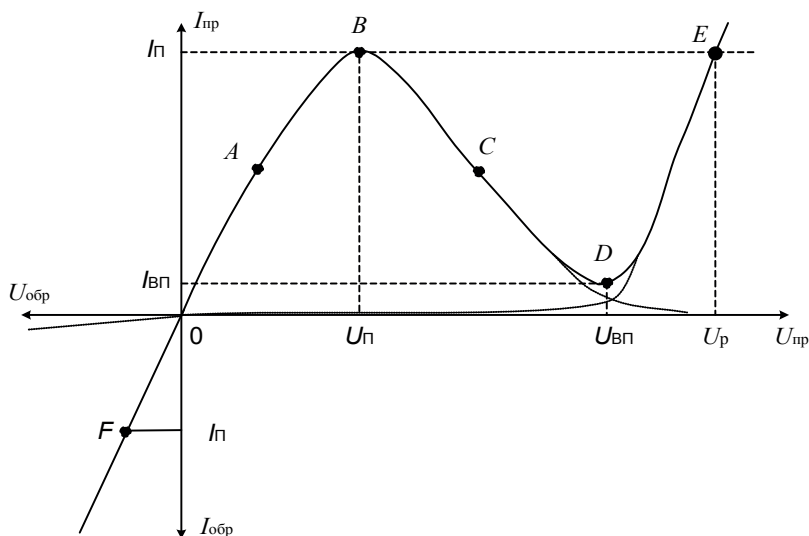


Рис. 24. Вольтамперная характеристика идеального электронно-дырочного перехода с туннельным эффектом

Как показано на рис. 25, при $U_{\text{пр1}} > 0$ свободные энергетические уровни валентной зоны p -области, расположенные непосредственно над энергетическим уровнем Ферми, оказываются на одной высоте с энергетическими уровнями зоны проводимости n -области, которые заполнены электронами. Поэтому будет происходить преимущественное туннелирование электронов из полупроводника n -типа в полупроводник p -типа на свободные энергетические уровни валентной зоны: $I_{Tn} \gg I_{Tp}$, $I \cong I_{Tn}$.

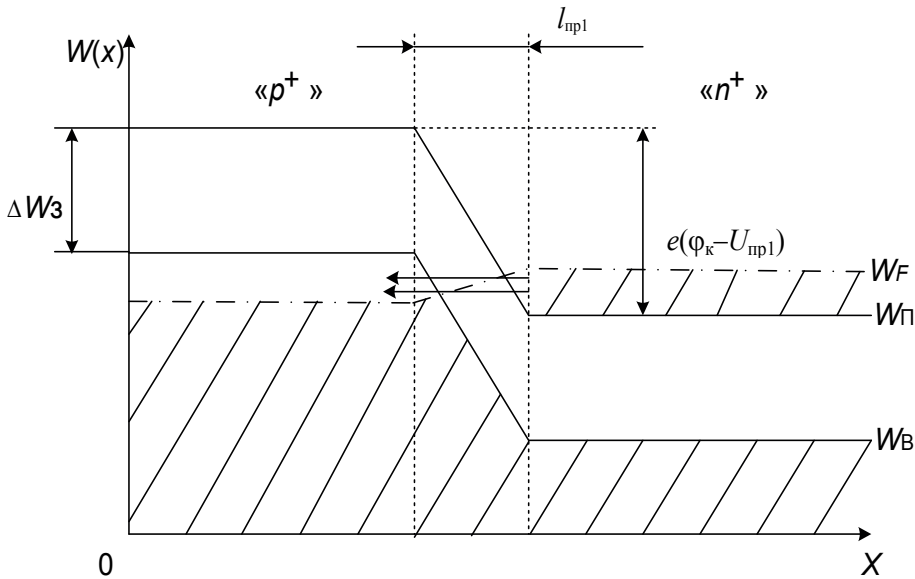


Рис. 25. Энергетическая диаграмма электронно-дырочного перехода с туннельным эффектом при $U_{\text{п}} > U_{\text{пр1}} > 0$

В точке A ВАХ (рис. 24) имеет место и диффузионная составляющая тока p - n -перехода: $I_D = I_{Dn} + I_{Dp}$. Поскольку степень легирования области полупроводника n - и p -типов одинакова, токи I_{Dn} , I_{Dp} будут иметь равные значения, но их величина при данном прямом напряжении $U_{\text{пр1}}$ невелика, потому что существует еще большее значение высоты потенциального барьера ($\phi_k - U_{\text{пр1}}$) и малое количество основных носителей заряда p - и n -областей полупроводника, способных преодолеть этот потенциальный (энергетический) барьер.

Энергетическая (зонная) диаграмма для точки B ВАХ (рис. 24) приведена на рис. 26.

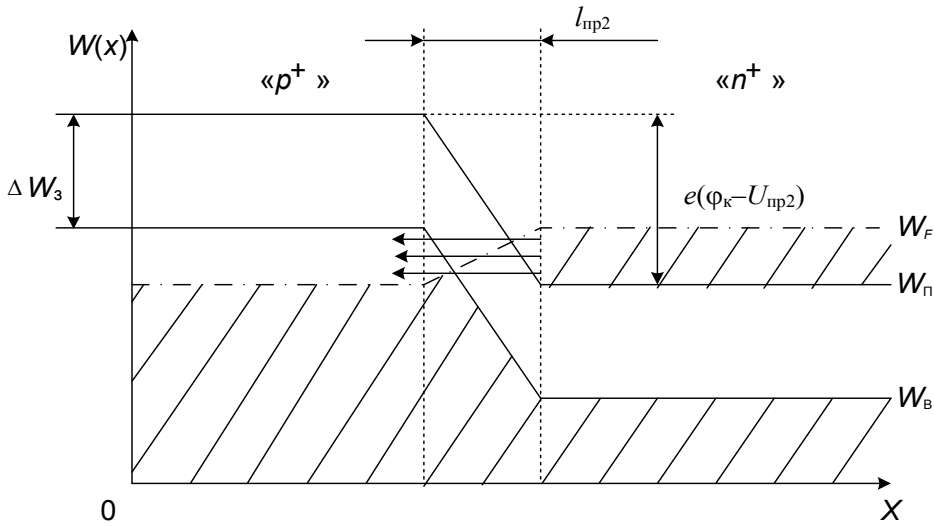


Рис. 26. Энергетическая диаграмма электронно-дырочного перехода с туннельным эффектом при $U_{np2} = U_{\Pi}$

В этом случае прямое напряжение на p - n -переходе имеет такое значение, когда свободные энергетические уровни валентной и примесной зон полупроводника p -типа окажутся на одной высоте с занятыми электронами энергетическими уровнями зоны проводимости и примесной зоны полупроводника n -типа.

При этом энергетический уровень Ферми полупроводника n -типа находится на одном уровне с энергией потолка валентной зоны полупроводника p -типа ($W_{Fn} = W_{Bp}$), а энергетический уровень Ферми полупроводника p -типа совпадает с энергией дна зоны проводимости полупроводника n -типа ($W_{Fp} = W_{\Pi n}$). В этом случае перекрытие зоны проводимости полупроводника n -типа с валентной зоной полупроводника p -типа будет максимальным, и количество туннельных переходов из зоны проводимости полупроводника n -типа в валентную зону полупроводника p -типа будет максимальным, значение туннельного тока p - n -перехода будет также наибольшим. Отсюда при прямом напряжении $U_{np2} = U_{\Pi}$, называемым напряжением пика, ток p - n -перехода $I \cong I_{Tn} = \max$ и называется током пика (рис. 24). В точке B ВАХ (рис. 24) диффузионная составляющая тока p - n -перехода $I_D = I_{Dn} + I_{Dp}$ увеличивается, но, по сравнению с $I_{Tn} = I_{\Pi}$, еще имеет очень малое значение, и полный ток p - n -перехода в основном определяется туннельной составляющей тока: $I_{Tn} \gg I_D > I_E$, $l_{np2} < l_{np1}$.

Энергетическая (зонная) диаграмма для точки *C* ВАХ (рис. 24) представлена на рис. 27.

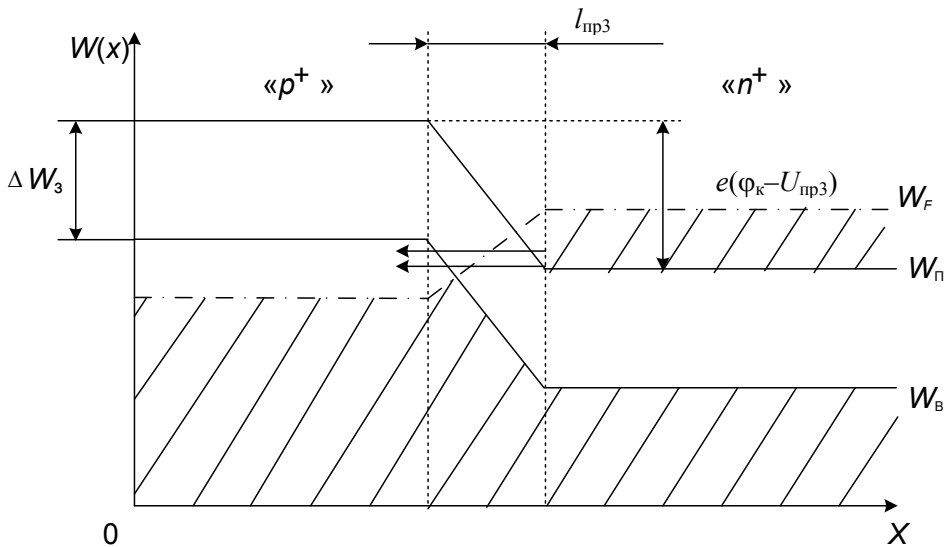


Рис. 27. Энергетическая диаграмма электронно-дырочного перехода с туннельным эффектом при $U_{пр3} > U_{п}$

При прямом напряжении $U_{пр3} > U_{п}$ происходит дальнейшее смещение энергетических уровней области полупроводника *n*-типа по отношению к энергетическим уровням полупроводника *p*-типа, перекрытие зоны проводимости полупроводника *n*-типа и валентной зоны полупроводника *p*-типа будет уменьшаться. Таким образом, количество свободных энергетических уровней валентной зоны полупроводника *p*-типа и количество занятых электронами энергетических уровней зоны проводимости полупроводника *n*-типа, находящихся напротив друг друга, будут уменьшаться, а это приводит к снижению количества туннельных переходов из зоны проводимости полупроводника *n*-типа в валентную зону полупроводника *p*-типа и, соответственно, туннельного тока *p-n*-перехода.

Диффузионная составляющая тока в точке *C* ВАХ будет больше, чем в точке *B* (рис. 24), но ее удельный вес в полном прямом токе *p-n*-перехода все еще маленький, поэтому в точке *C* прямой ток равен: $I_{пр} \cong I_{Tn(C)} \gg I_{D(C)} > I_E$.

Энергетическая (зонная) диаграмма для точки *D* вольтамперной характеристики (рис. 24) изображена на рис. 28.

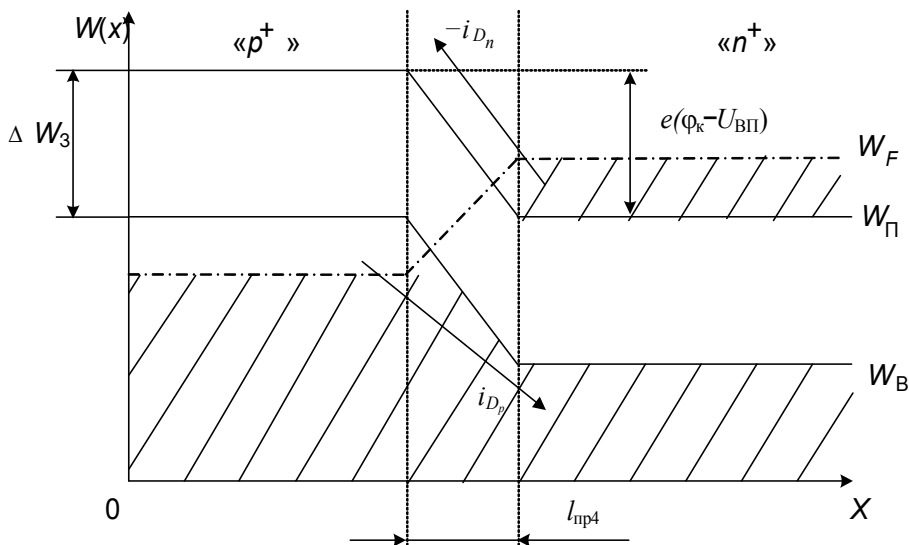


Рис. 28. Энергетическая диаграмма электронно-дырочного перехода с туннельным эффектом при $U_{\text{пр4}} = U_{\text{ВП}}$

При дальнейшем увеличении прямого напряжения $U_{\text{пр4}} > U_{\text{пр3}}$ продолжается смещение энергетических уровней полупроводника n -типа относительно энергетических уровней полупроводника p -типа. При этом свободные энергетические уровни валентной зоны полупроводника p -типа находятся напротив запрещенной зоны полупроводника n -типа, а занятые энергетические уровни зоны проводимости полупроводника n -типа находятся напротив запрещенной зоны полупроводника p -типа, и условия для туннельных переходов заметно ухудшаются. В идеальном случае туннельный эффект прекращается, и $I_T = 0$. Напряжение $U_{\text{пр4}} = U_{\text{ВП}}$ получило название напряжения впадины, а прямой ток электронно-дырочного перехода, соответствующий напряжению впадины, называется током впадины $I_{\text{ВП}}$. Ток $I_{\text{ВП}}$ в точке D ВАХ (рис. 24) определяется суммой избыточного туннельного тока и нарастающего тока диффузии при прямом смещении p - n -перехода.

В случае возрастания прямого напряжения $U_{\text{пр}} > U_{\text{пр4}}$ туннельная составляющая тока устремляется к нулю, а диффузионная составляющая прямого тока начинает экспоненциально возрастать за счет снижения энергетического барьера p - n -перехода. В точке E ВАХ (рис. 24), когда $I_{\text{пр}} = I_{\text{П}}$, напряжение на p - n -переходе называется напряжением раствора ($U_{\text{пр}} = U_{\text{р}}$) прямой ветви ВАХ электронно-дырочного перехода с туннельным эффектом.

Обратная ветвь ВАХ p - n -перехода с туннельным эффектом (участок OF , рис. 24) определяется двумя составляющими токов электронно-дырочного перехода: I_E — дрейфовый ток p - n -перехода, который образуется за счет направленного движения неосновных носителей заряда в ускоряющем электрическом поле электронно-дырочного перехода; $I_T = I_{Tp}$ — туннельная составляющая тока, образованная туннельными переходами электронов с заполненных энергетических уровней валентной зоны полупроводника p -типа на свободные энергетические зоны проводимости полупроводника n -типа. Энергетическая (зонная) диаграмма p - n -перехода для этого случая приведена на рис. 29. Обратный ток на участке OF (рис. 24) определяется суммой

$$I_{OBR} = I_E + I_{Tp}. \quad (40)$$

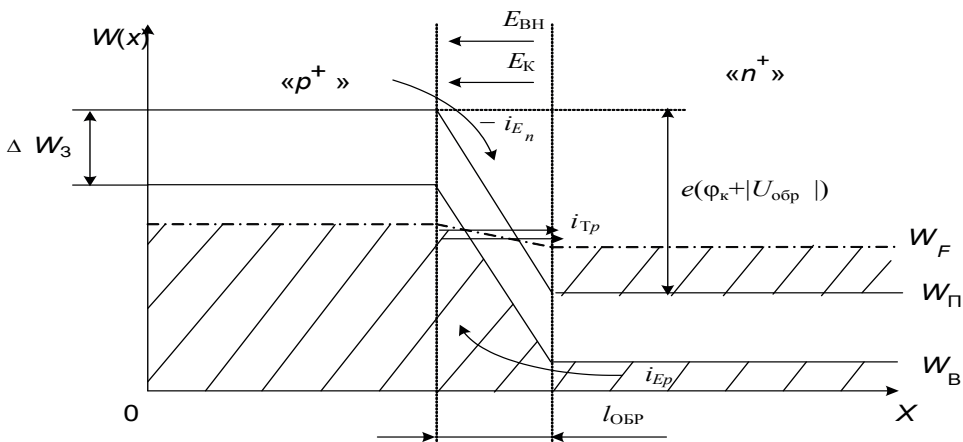


Рис. 29. Энергетическая диаграмма электронно-дырочного перехода с туннельным эффектом при $U = U_{OBR}$

Туннельная составляющая тока I_{OBR} с увеличением $|U_{OBR}|$ возрастает по экспоненциальному закону, а величина дрейфовой составляющей обратного тока незначительна вследствие малой концентрации неосновных носителей заряда в p - и n -областях электронно-дырочного перехода на основе «вырожденных» полупроводников. В точке F ВАХ (рис. 24) обратный ток равен току пика ($I_{OBR} = I_{Tp}$), и эта величина тока достигается при малых значениях обратного напряжения (десятки милливольт).

3.3. Вольтамперная характеристика реального электронно-дырочного перехода с туннельным эффектом

В реальном электронно-дырочном переходе с туннельным эффектом в сильной степени изменяется прямая ветвь ВАХ. В основном изменяется значение напряжения впадины. Если для идеального p - n -перехода с туннельным эффектом $U_{вп} \cong 2U_{п}$, то для реального p - n -перехода $U_{вп} \cong (5-7)U_{п}$.

Вольтамперная характеристика реального электронно-дырочного перехода с туннельным эффектом приведена на рис. 30.

Возрастание напряжения $U_{вп}$ на рис. 30 вызвано наличием в p - n -переходе избыточного туннельного тока. Электронно-дырочный переход, образованный «вырожденными» примесными полупроводниками, содержит в запрещенной зоне зонной диаграммы локальные энергетические уровни примесных атомов, которые образуются из-за наличия неконтролируемых примесей в исходных полупроводниках.

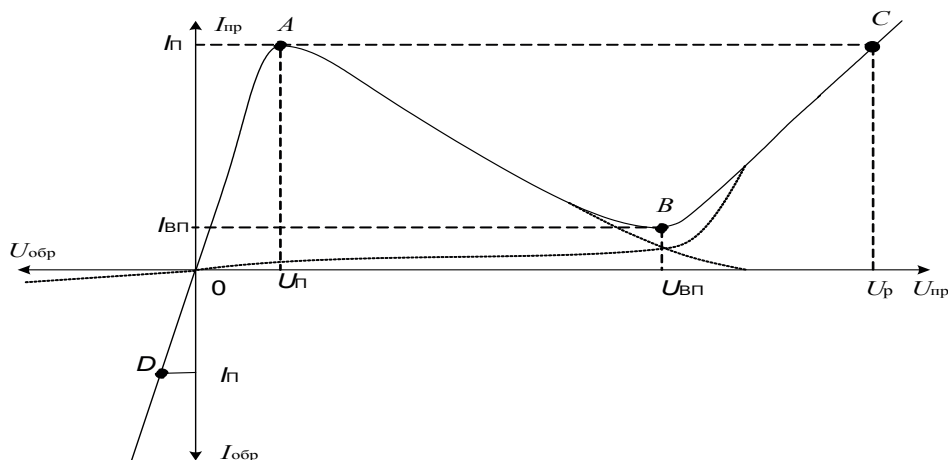


Рис. 30. Вольтамперная характеристика реального p - n -перехода с туннельным эффектом

Присутствие локальных энергетических уровней таких примесных атомов в запрещенной зоне приводит к появлению дополнительных туннельных переходов, а следовательно, избыточного туннельного тока. Энергетическая диаграмма для этого случая приведена на рис. 31.

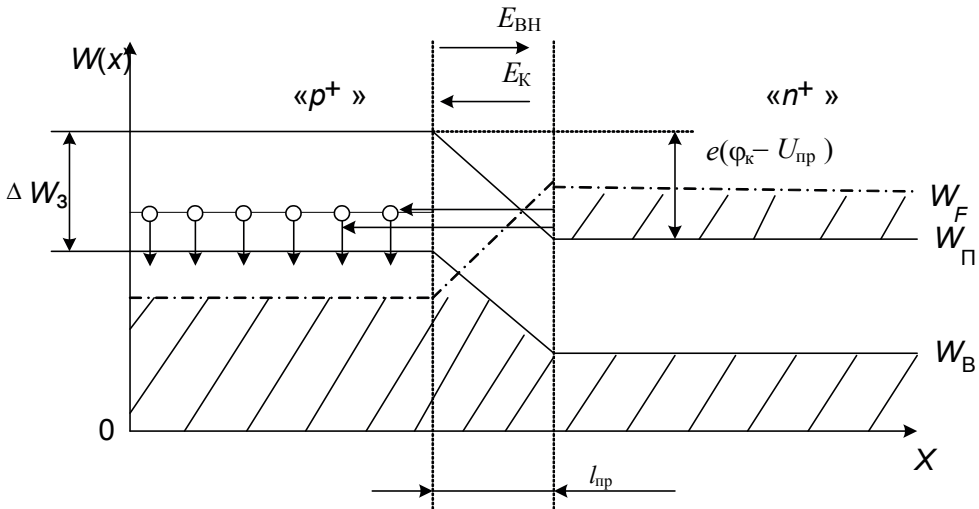


Рис. 31. Энергетическая диаграмма реального электронно-дырочного перехода с туннельным эффектом при $U_{\text{пр}} > 2U_{\text{П}}$

При подаче прямого напряжения на реальный p - n -переход с туннельным эффектом величиной более двух значений напряжения пика ($U_{\text{пр}} > 2U_{\text{П}}$) имеют место туннельные переходы электронов с занятых энергетических уровней зоны проводимости полупроводника n -типа на локальные энергетические уровни примесных атомов в запрещенной зоне полупроводника p -типа, а затем уже с этих локальных энергетических уровней электроны переходят на свободные энергетические уровни валентной зоны полупроводника p -типа. Эти дополнительные туннельные переходы и образуют избыточный туннельный ток p - n -перехода, увеличивая тем самым участок туннельной составляющей прямого тока вольтамперной характеристики электронно-дырочного перехода (рис. 30). В основном удлиняется «падающий участок» прямой ветви ВАХ (рис. 30) (участок AB , с отрицательным дифференциальным сопротивлением $r_{\text{диф.}AB} < 0$).

Дифференциальное сопротивление участка AB ВАХ (рис. 30) определяется по формуле

$$r_{\text{диф.}AB} = \frac{U_{\text{П}} - U_{\text{ВП}}}{I_{\text{П}} - I_{\text{ВП}}}, \quad (41)$$

где $U_{\text{П}}$ — напряжение пика; $U_{\text{ВП}}$ — напряжение впадины; $I_{\text{П}}$ — ток пика; $I_{\text{ВП}}$ — ток впадины.

Точка *B* соответствует напряжению впадины ВАХ (рис. 30) и образуется в месте пересечения диффузионной и туннельной составляющих прямого тока

$$I_{\text{ВП}} = I_{D(B)} + I_{Tn(B)} \mid U_{\text{ПР}} = U_{\text{ВП}} \quad (42)$$

Точка *C* ВАХ (рис. 30) определяет напряжение раствора U_p . В точке *C* значение диффузионной составляющей прямого тока становится равной току пика ВАХ ($I_D = I_{\text{П}}$). За счет смещения $U_{\text{ВП}}$ в сторону больших прямых напряжений напряжение раствора U_p также возрастает по сравнению с его значением для ВАХ идеального *p-n*-перехода с туннельным эффектом.

Электронно-дырочные переходы с туннельным эффектом изготавливаются с использованием полупроводниковых материалов на основе германия (Ge) и арсенида галлия (GaAs), так как в этом случае получается лучшее отношение тока пика к току впадины $\left(\frac{I_{\text{П}}}{I_{\text{ВП}}} > 5 \right)$. При

этом *p-n*-переходы с туннельным эффектом имеют параметры, приведенные в табл. 7.

Таблица 7

Параметры электронно-дырочного перехода с туннельным эффектом на основе германия и арсенида галлия

Параметры	Материал полупроводника <i>p-n</i> -перехода	
	Ge	GaAs
$U_{\text{П}}$, мВ	40–90	100–180
$U_{\text{ВП}}$, мВ	250–350	400–700
U_p , В	0,40–0,45	1,0–1,2
$\frac{I_{\text{П}}}{I_{\text{ВП}}}$	5–20	8–40

Величина тока пика $I_{\text{П}}$ зависит от площади *p-n*-перехода и степени легирования исходных «вырожденных» полупроводников. При увеличении концентрации примесей ($N_{\text{ПР}}$) возрастает и ток пика $I_{\text{П}}$. Электронно-дырочные переходы с туннельным эффектом на основе крем-

ниевых полупроводников имеют малое отношение $\frac{I_{\text{П}}}{I_{\text{ВП}}}$, поэтому на практике они не применяются.

3.4. Влияние температуры окружающей среды на ВАХ реального туннельного диода

Колебания температуры окружающей среды приводят к изменениям характеристик и параметров примесных полупроводников, а следовательно, и полупроводниковых структур на их основе. Из-за высокой степени легирования исходных примесных полупроводников электронно-дырочного перехода с туннельным эффектом влияние температуры проявляется значительно слабее, чем в обычных p - n -переходах. Особенно это заметно на участке вольтамперной характеристики p - n -перехода с туннельным эффектом, на котором ток определяется туннельной составляющей общего тока p - n -перехода:

$$I = I_{\text{T}} + I_{\text{D}} + I_{\text{E}},$$

где I — общий ток p - n -перехода с туннельным эффектом; I_{D} — диффузионная составляющая тока; I_{T} — туннельная составляющая тока; I_{E} — дрейфовая составляющая тока. На ВАХ p - n -перехода с туннельным эффектом, представленной на рис. 30, ток на участке $DOAB$ зависит в основном от туннельной составляющей. Поэтому на указанном участке ВАХ p - n -перехода изменение температуры окружающей среды будет сказываться слабо, как это показано на рис. 32.

На участке OD ВАХ (рис. 32) обратный ток с ростом температуры окружающей среды увеличивается незначительно, так как при этом возрастает дрейфовая составляющая тока I_{E} , которая изменяется по экспоненциальному закону от температуры, а туннельная составляющая I_{T} изменяется очень слабо. Вес I_{E} в выражении $I = I_{\text{T}} + I_{\text{D}} + I_{\text{E}}$ на участке OD ВАХ (рис. 32) очень мал. При увеличении температуры от значения $T_1 = +20^\circ\text{C}$ до величины $T_2 = +70^\circ\text{C}$ экспоненциально возрастает дрейфовая составляющая тока I_{E} , уменьшается ширина обратносмещенного p - n -перехода, растет напряженность электрического поля на p - n -переходе ($E_{\text{ОБР}} = \frac{|U_{\text{ОБР}}|}{l_{\text{ОБР}}}$), несколько возрастает $I_{\text{Tр}}$ (тун-

нельная составляющая тока обратносмещенного p - n -перехода), это приводит к увеличению общего обратного тока $I_{\text{ОБР}} = I_{\text{Тр}} + I_{\text{Е}}$, температурный коэффициент напряжения обратной ветви ВАХ p - n -перехода с туннельным эффектом $\text{ТКН}_{\text{ОБР}} = \frac{\Delta U_{\text{ОБР}}}{\Delta T} < 0$. При изменении температуры окружающей среды обратная ветвь ВАХ располагается очень близко к первоначальной зависимости при $T_1 = +20^\circ\text{C}$.

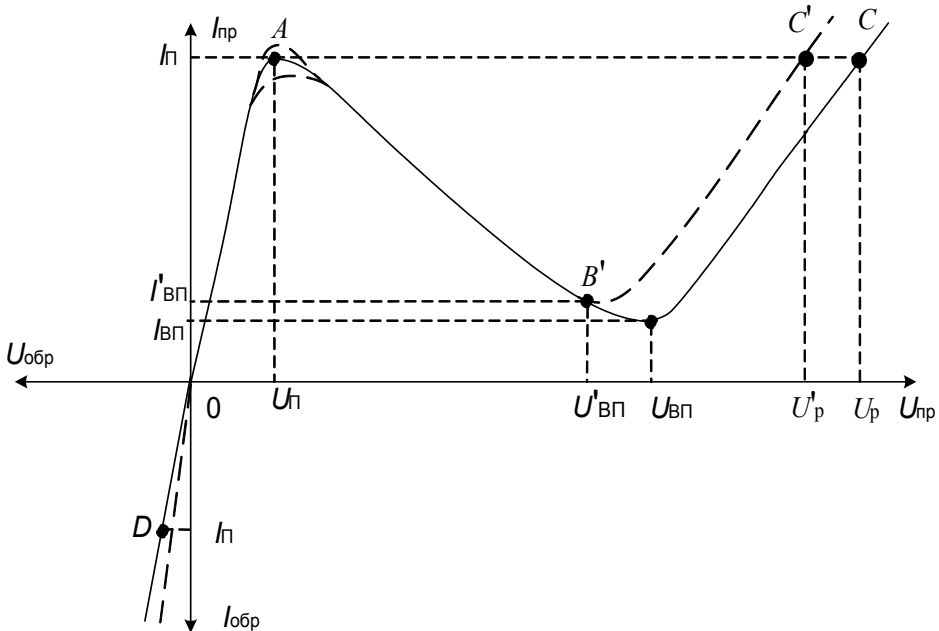


Рис. 32. ВАХ реального p - n -перехода с туннельным эффектом при изменении температуры окружающей среды: — $T_1 = +20^\circ\text{C}$; — — — $T_2 = +70^\circ\text{C}$

Туннельная ветвь прямого тока ВАХ p - n -перехода с туннельным эффектом (участок OAB зависимости, рис. 32) также слабо зависит от температуры окружающей среды. При возрастании температуры изменяется лишь ток пика $I_{\text{П}}$. Он может как уменьшаться, так и увеличиваться. Это обусловлено следующими двумя факторами: во-первых, при возрастании температуры снижается значение контактной разности потенциалов $\phi_{\text{К}}$ p - n -перехода, вследствие чего уменьшается равновесная ширина p - n -перехода l_0 и $I_{\text{ПР}}$, что приводит к росту напряженности электрического поля E и туннельной составляющей тока; во-вторых, при увеличении температуры происходит смещение энер-

гетического уровня Ферми ближе к середине запрещенной зоны (это следует из теории примесных полупроводников) в полупроводниках p^+ - и n^+ -типов, а это приводит к уменьшению перекрытия зон в электронно-дырочном переходе, содержащих энергетические уровни, заполненные электронами. При этом количество туннельных переходов снижается, а также уменьшаются значения токов I_{Tn} и I_{Π} .

На диффузионном участке (участок BC , рис. 32) прямой ветви ВАХ электронно-дырочного перехода с туннельным эффектом влияние температуры проявляется так же, как и для обычного p - n -перехода. С возрастанием температуры снижается значение контактной разности потенциалов ϕ_K , растет значение диффузионной составляющей тока I_D и возрастает величина прямого тока I_{Π} p - n -перехода.

Поэтому диффузионный участок BC ВАХ p - n -перехода (рис. 32) с увеличением температуры ($T_2 = +70^\circ\text{C}$) смещается влево. В этом случае увеличивается значение тока впадины, и он становится равным $I'_{ВП}$, уменьшается величина напряжения впадины до значения $U'_{ВП}$, снижается напряжение раствора до величины U'_p . Температурный коэффициент напряжения участка BC прямой ветви ВАХ (рис. 32) меньше нуля и определяется из соотношения

$$\text{ТКН}_{\Pi p (BC)} = \frac{\Delta U_{\Pi p}}{\Delta T} < 0. \quad (43)$$

3.5. Параметры электронно-дырочного перехода с туннельным эффектом

Параметры электронно-дырочных переходов с туннельным эффектом имеют некоторую специфику по сравнению с параметрами, применяемыми для характеристики обычных p - n -переходов. В качестве параметров используют напряжения и токи, определяющие характерные точки вольтамперной характеристики (рис. 30). К ним относятся I_{Π} , U_{Π} , $I_{ВП}$, $U_{ВП}$, U_p , $\frac{I_{\Pi}}{I_{ВП}}$, $U_{\text{обр. доп.}}$, I_{Π} — пиковый ток. Это прямой ток в точке

максимума прямой ветви вольтамперной характеристики (точка A , рис. 30). Величина тока пика зависит, во-первых, от степени легирования областей, так как это определяет глубину залегания энергетических уровней Ферми в разрешенных зонах исходных полупроводников n^+ -

и p^+ -типов; во-вторых, пропорциональна площади электронно-дырочного перехода. При увеличении концентрации примесей уменьшается равновесная ширина p - n -перехода l_0 , а контактная разность потенциалов Φ_K растет, что приводит к увеличению напряженности электрического поля в переходе и значительному возрастанию тока пика. Величина тока пика для различных электронно-дырочных переходов с туннельным эффектом колеблется от единиц миллиампер до нескольких ампер. U_{Π} — напряжение пика. Это прямое напряжение, соответствующее пиковому току I_{Π} (точка A ВАХ, рис. 30). U_{Π} зависит от степени легирования и составляет обычно 60–90 мВ для германиевых и 100–180 мВ для арсенид-галлиевых p - n -переходов.

$I_{ВП}$ — ток впадины. Это прямой ток в точке минимума ВАХ (рис. 30). Ток впадины зависит от материала полупроводника (энергии ширины запрещенной зоны), из которого изготовлен электронно-дырочный переход, и температуры окружающей среды. $U_{ВП}$ — напряжение впадины. Это прямое напряжение, соответствующее току впадины $I_{ВП}$ (точка B ВАХ рис. 30). Напряжение впадины тем больше, чем выше энергия ширины запрещенной зоны полупроводника. Для германиевых электронно-дырочных переходов с туннельным эффектом $U_{ВП} = 250–300$ мВ, а для p - n -переходов, выполненных на основе арсенида галлия, $U_{ВП} = 500–700$ мВ. U_p — напряжение раствора. Это прямое напряжение, которое больше напряжения впадины, и соответствует прямому току, равному току пика. Напряжение раствора зависит от материала полупроводника, из которого изготовлен p - n -переход. Обычно $U_{p\text{ Ge}} = 400–450$ мВ; а $U_{p\text{ GaAs}} = 1000–1200$ мВ. $\frac{I_{\Pi}}{I_{ВП}}$ — отношение пикового тока к току впади-

ны характеризует крутизну падающего участка прямой ветви ВАХ (рис. 30). Это отношение зависит от материала полупроводника, на основе которого выполнен p - n -переход с туннельным эффектом, и составляет для германиевых переходов (5–10), а для арсенид-галлиевых (8–40). $U_{\text{ОБР. ДОП}}$ — максимально допустимое обратное напряжение, соответствующее значению обратного тока $I_{\text{ОБР}(D)} = -I_{\Pi}$ (точка D ВАХ, рис. 30).

Кроме параметров, определяемых значениями токов и напряжений ВАХ электронно-дырочного перехода с туннельным эффектом, имеются сопротивления постоянному и переменному токам для прямой и обратной ветвей вольтамперной характеристики (рис. 30). R_0 — сопротивление постоянному току. Для прямой ветви ВАХ (рис. 30) R_0 обычно определяется для точки C (рис. 30):

$$R_{0(C)} = \frac{U_P}{I_P}. \quad (44)$$

Для обратной ветви ВАХ (рис. 30) R_0 определяется для точки D :

$$R_{0(D)} = \left| \frac{U_{\text{ОБР.ДОП}}}{I_P} \right|. \quad (45)$$

$r_{\text{диф}}$ — сопротивление переменному току. Для прямой ветви ВАХ выделяются три характерных участка. Для участка OA :

$$r_{\text{диф } (OA)} = \frac{\Delta U_{\text{ПР1}}}{\Delta I_{\text{ПР1}}} > 0; \quad (46)$$

для участка AB (падающий участок прямой ветви ВАХ, рис. 30):

$$r_{\text{диф } (AB)} = \frac{U_P - U_{\text{ВП}}}{I_P - I_{\text{ВП}}} < 0; \quad (47)$$

для участка BC (участок диффузионной составляющей прямого тока ВАХ p - n -перехода, рис. 30):

$$r_{\text{диф } (BC)} = \frac{\Delta U_{\text{ПР2}}}{\Delta I_{\text{ПР2}}} > 0. \quad (48)$$

Для обратной ветви ВАХ (участок OD ВАХ, рис. 30) дифференциальное сопротивление находится из соотношения:

$$r_{\text{диф } (OD)} = \frac{\Delta U_{\text{ОБР}}}{\Delta I_{\text{ОБР}}} > 0. \quad (49)$$

Получение падающего участка вольтамперной характеристики туннельного диода и определение параметров связаны с определенными экспериментальными трудностями, вызванными необходимостью выполнения условий устойчивости схемы с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

Вольтамперные характеристики туннельного диода, получаемые при разных условиях, показаны на рис. 33, а его эквивалентная схема приведена на рис. 34, где C_d — диффузионная емкость перехода, $r_{\text{диф}}$ — отрицательное дифференциальное сопротивление диода, r_b — сопротивление базы, L_d — суммарная индуктивность выводов диода.

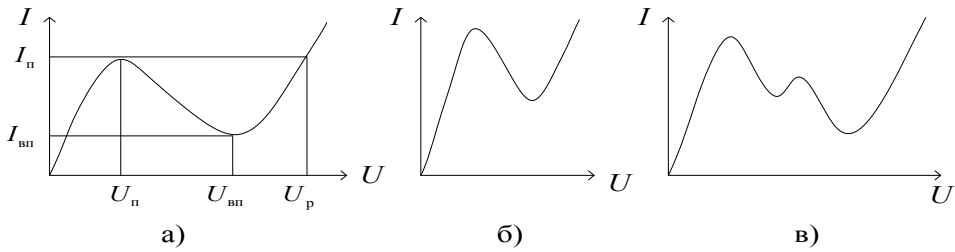


Рис. 33. Вольтамперные характеристики туннельного диода, снятые при разных условиях

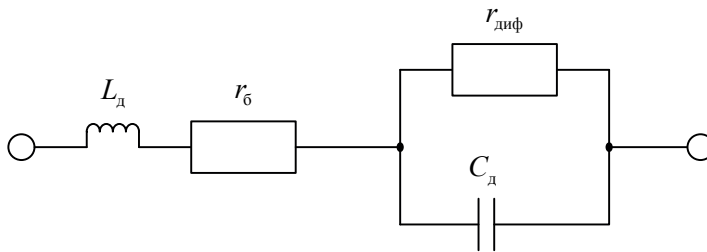


Рис. 34. Эквивалентная схема туннельного диода при прямом смещении

Простейшая цепь из включенных последовательно туннельного диода и источника напряжения с внутренним сопротивлением R_i будет устойчива во всех точках падающего участка вольтамперной характеристики, если будут выполнены следующие условия:

$$R_i + r_б < r_{\text{диф}}, \quad (50)$$

$$L/(R_i + r_б) < r_{\text{диф}} C_d, \quad (51)$$

где L — общая индуктивность цепи.

Если не выполняется первое условие устойчивости (50) на некотором отрезке падающего участка характеристики, то получаются скачки тока и напряжения (рис. 33, б). Для выполнения этого условия устойчивости необходим низкоомный источник питания с внутренним сопротивлением, меньшим минимального модуля дифференциального отрицательного сопротивления.

При невыполнении второго условия устойчивости (51) в цепи возбуждаются паразитные колебания, приводящие к искажению формы характеристики (рис. 33, в). Это условие трудновыполнимо на практике, так как в реальной измерительной схеме к индуктивности диода добавляется индуктивность измерительных приборов. Для уменьшения сум-

марной индуктивности при снятии вольтамперной характеристики в реальной схеме включают параллельно диоду низкоомное сопротивление.

Нормальная характеристика туннельного диода приведена на рис. 33, а.

3.6. Использование туннельного диода в качестве усилителя

Туннельный диод работает как усилитель сигналов при выполнении условия

$$R_{н1} < \left| r_{\text{диф}} = \frac{U_{\pi} - U_{\text{вп}}}{I_{\pi} - I_{\text{вп}}} < 0 \right|. \quad (52)$$

Положение нагрузочной прямой на вольтамперной характеристике туннельного диода определяется напряжением смещения и величиной сопротивления нагрузки (рис. 35). Схема включения туннельного диода приведена на рис. 36. Если условие (52) нарушается и $R_{н2} > \left| r_{\text{диф}} = \frac{U_{\pi} - U_{\text{вп}}}{I_{\pi} - I_{\text{вп}}} < 0 \right|$, то туннельный диод переходит в переключа-
 тельный или ключевой режим, а рабочая точка A является точкой неустойчивого равновесия.

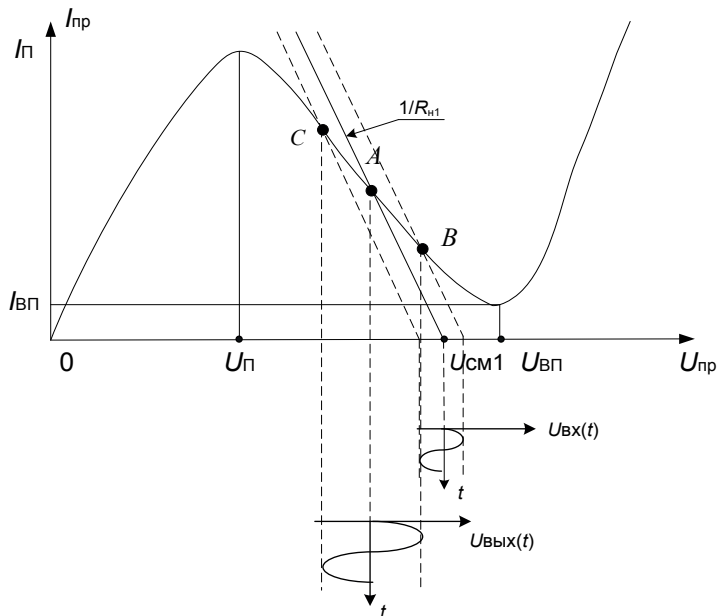


Рис. 35. Положение рабочей точки на нагрузочной прямой в усилительном режиме

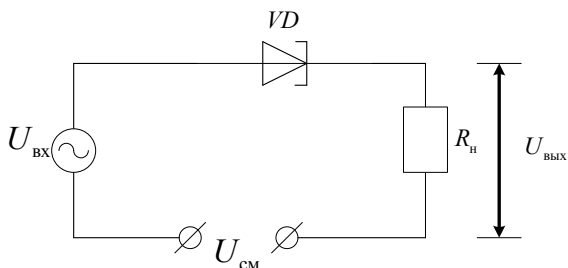


Рис. 36. Схема включения туннельного диода в усилительном режиме

Вольтамперная характеристика с нагрузочной прямой принимает вид, показанный на рис. 37. Точки *B* и *C* являются точками устойчивого равновесия и находятся на пересечении нагрузочной прямой с восходящими ветвями ВАХ туннельного диода. В переключательном режиме напряжение смещения должно быть больше, чем в усилительном режиме $U_{см2} > U_{см1}$.

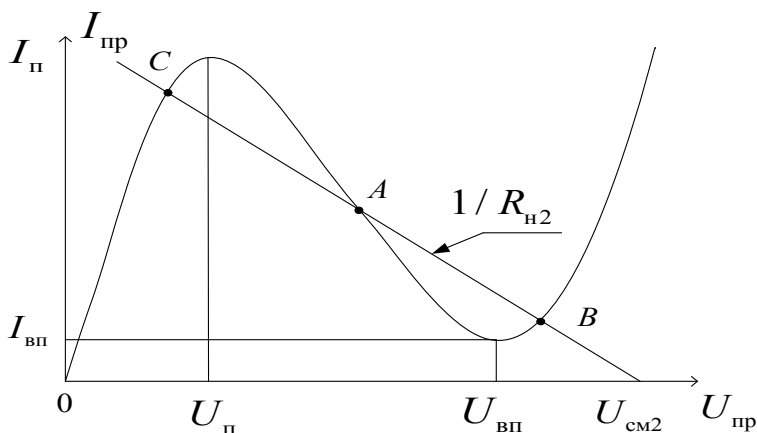


Рис. 37. Положение нагрузочной прямой в переключательном режиме

3.7. Лабораторное задание № 3 «Исследование характеристик и параметров туннельных диодов»

Цель работы

Ознакомиться с физическими основами работы электронно-дырочных переходов, работающих при наличии туннельного эффекта, исследовать влияние материала полупроводника и температу-

ры окружающей среды на характеристики и параметры туннельных диодов.

1. Записать параметры исследуемых туннельных диодов (таблицы П.5–П.8 или [16]).

2. Собрать схему измерений для снятия прямой ветви ВАХ германиевого туннельного диода (рис. 38).

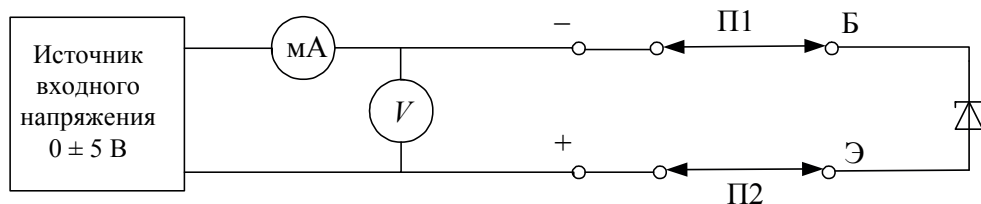


Рис. 38. Схема лабораторной установки для снятия прямой ветви ВАХ туннельных диодов

При снятии прямой ветви ВАХ туннельных диодов (рис. 38) задаются значениями прямого тока и измеряют напряжение на p - n -переходе, соответствующее заданному значению тока. Напряжение регулируется с помощью источника входного напряжения, которое может изменяться в диапазоне от 0 до 5 В. Особое внимание следует обратить на точность нахождения характерных точек прямой ветви вольтамперной характеристики, соответствующих току пика $I_{\text{п}}$ (напряжение пика $U_{\text{п}}$), току впадины $I_{\text{вп}}$ (напряжение впадины $U_{\text{вп}}$) и напряжению раствора $U_{\text{р}}$.

Не вставляя разъем с исследуемым полупроводниковым прибором в стенд, включить питание лабораторной установки. Выставить входное напряжение, подаваемое на исследуемый прибор, равное нулю, вставить разъем с исследуемым электронно-дырочным переходом в ответную часть разъема лабораторной установки. Лабораторную установку не выключать до окончания данного эксперимента. *Перед выключением* необходимо изъять из лабораторной установки разъем с исследуемым прибором, предварительно установив напряжение на входе, равное нулю.

Это важно!

При экспериментальных исследованиях электронно-дырочных переходов с туннельным эффектом не включать и не выключать питание лабораторной установки во избежание выхода из строя исследуемых приборов.

3. Снять прямую ветвь вольтамперной характеристики туннельного диода. Вначале определить точки экстремума вольтамперной характеристики, которые соответствуют значениям токов пика $I_{\text{п}}$ и впадины $I_{\text{вп}}$. При снятии характеристики задаваться значениями прямого тока (предварительно разбив каждый участок прямой ветви ВАХ на 5–8 точек) и измерять при этом величины прямого напряжения. С помощью регулятора напряжения « $U_{\text{вх}}$ точно» определять величины $I_{\text{п}}$, $U_{\text{п}}$, $I_{\text{вп}}$, $U_{\text{вп}}$. Диффузионную ветвь характеристики снимать до величины тока, равную току пика, определив при этом значение напряжения раствора $U_{\text{р}}$.

4. Собрать схему для снятия обратной ветви ВАХ германиевого туннельного диода (рис. 39). При снятии обратной ветви ВАХ туннельных диодов задаются значениями обратного тока и измеряют величину обратного напряжения, соответствующую данному значению обратного тока. Напряжение регулируется с помощью источника напряжения, которое может изменяться в диапазоне от 0 до 5 В.

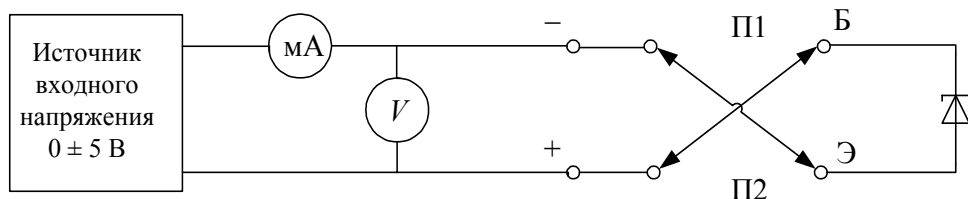


Рис. 39. Схема лабораторной установки для снятия обратной ветви ВАХ туннельных диодов

При включении лабораторной установки неукоснительно соблюдать последовательность и требования п. 2, во избежание вывода из строя исследуемого прибора.

5. Снять обратную ветвь ВАХ германиевого туннельного диода $I_{\text{обР}} = f(U_{\text{обР}})$, изменяя величину обратного напряжения. При снятии обратной ветви ВАХ необходимо задаваться значениями обратного тока в диапазоне от 0 до $I_{\text{п}}$ и измерять при этом величину обратного напряжения.

6. Исследуемый германиевый туннельный диод поместить в термостат, предварительно нагретый до +70 °С. Через 5 мин повторить действия, указанные в пунктах 2–5.

7. Собрать схему измерений для снятия прямой ветви ВАХ арсенид-галлиевого туннельного диода (рис. 38).

8. Снять при комнатной температуре прямую ветвь ВАХ арсенид-галлиевого туннельного диода, воспользовавшись рекомендациями п. 3.

9. Собрать схему для снятия обратной ветви вольтамперной характеристики арсенид-галлиевого туннельного диода (рис. 39).

10. Снять при комнатной температуре обратную ветвь ВАХ туннельного диода $U_{\text{ОБР}} = f(I_{\text{ОБР}})$, изменяя величину обратного напряжения и пользуясь рекомендациями п. 5.

11. Довести температуру термостата до $(70-75)^\circ\text{C}$. Поместить в термостат исследуемый арсенид-галлиевый туннельный диод и через 5 мин повторить п. 7–10.

12. Собрать схему установки для исследования усилительных свойств туннельного диода согласно рис. 40.

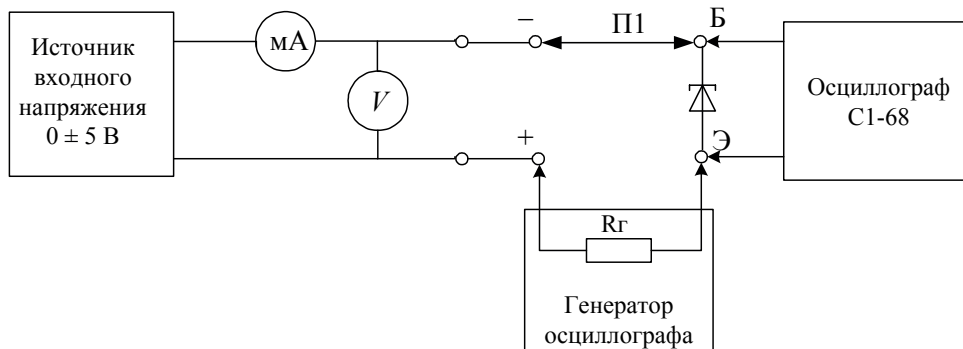


Рис. 40. Схема лабораторной установки для снятия усилительных свойств туннельного диода

Переключатель длительности развертки осциллографа «Длительность» установить в положение «1 мс», а переключатель «Усиление» в положение «0,1 В/см» (плавные регуляторы этих переключателей должны быть всегда в правом положении).

Вход осциллографа Y подключить параллельно диоду. В качестве входного сигнала используется генератор прямоугольных импульсов осциллографа C1–68: частота — 2 кГц, амплитуда — 100 мВ, входное сопротивление генератора $R_{\text{г}} = 50 \text{ Ом}$.

1) Включить лабораторный стенд и выставить $U_{\text{вх}} = 0$, вынуть из гнезд туннельный диод, получить на экране осциллографа устойчивое изображение входного сигнала (с помощью ручек «Стаб» и «Уровень») и зарисовать его форму;

2) Вставить в гнезда туннельный диод и, плавно увеличивая входное напряжение, добиться устойчивой осциллограммы выходного

напряжения, соответствующей максимальной амплитуде выходного напряжения, зарисовать осциллограмму выходного напряжения и определить его амплитуду, записать значение тока туннельного диода и величину источника питания E_a ;

3) Определить величину коэффициента усиления по напряжению

$$K_u = U_{m \text{ вых}} / U_{m \text{ вх}}.$$

Обработка результатов эксперимента

1. Построить ВАХ исследованных туннельных диодов при комнатной и повышенной температурах.

2. Определить значения $I_{\text{П}}$, $U_{\text{П}}$, $I_{\text{ВП}}$, $U_{\text{ВП}}$, $U_{\text{Р}}$, $U_{\text{ОБР}}$ ($I_{\text{ОБР}} = |I_{\text{П}}|$) для комнатной и повышенной температур.

3. Определить дифференциальное сопротивление на всех участках прямой ветви ВАХ исследованных диодов, используя формулу

$$r_{\text{диф}} = \frac{\Delta U_{\text{ПР}}}{\Delta I_{\text{ПР}}}.$$

4. Определить дифференциальное сопротивление обратной ветви ВАХ исследованных диодов, используя формулу $r_{\text{диф}} = \frac{\Delta U_{\text{ОБР}}}{\Delta I_{\text{ОБР}}}.$

5. Определить сопротивление исследованных переходов обратному току, используя соотношение $R_0 = \frac{U_{\text{ОБР}}}{I_{\text{ОБР}}}$, при $U_{\text{ОБР}}$, соответствующему

тому $I_{\text{ОБР}} = |I_{\text{П}}|$, для комнатной и повышенной температур.

Рассчитанные параметры свести в табл. 8.

Таблица 8

Расчетные данные исследованных туннельных диодов

Параметры	$I_{\text{П}}$	$U_{\text{П}}$	$I_{\text{ВП}}$	$U_{\text{ВП}}$	$U_{\text{Р}}$	$r_{\text{диф ПР}}$	$r_{\text{диф ОБР}}$	R_0	$I_{\text{П}}/I_{\text{ВП}}$
Размерность	мА	мВ	мкА	мВ	В	Ом	Ом	Ом	
$T_1 = 20^\circ \text{C}$	Ge					1			
						2			
						3			
	GaAs					1			
						2			
						3			

Окончание табл. 8

Параметры	$I_{\text{П}}$	$U_{\text{П}}$	$I_{\text{ВП}}$	$U_{\text{ВП}}$	$U_{\text{Р}}$	$r_{\text{ДИФ ПР}}$	$r_{\text{ДИФ ОБР}}$	R_0	$I_{\text{П}}/I_{\text{ВП}}$
Размерность	мА	мВ	мкА	мВ	В	Ом	Ом	Ом	
$T_2 = 70^\circ\text{C}$	Ge					1			
						2			
						3			
	GaAs					1			
						2			
						3			

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Формулировку цели исследования;
2. Краткую характеристику исследуемых туннельных диодов;
3. Схемы экспериментальных исследований, собираемых на лабораторной установке;
4. Таблицы экспериментальных данных;
5. Графики вольтамперных характеристик при комнатной и повышенной температурах;
6. Расчет параметров исследованных туннельных диодов;
7. Сводную таблицу с экспериментальными и расчетными данными;
8. Осциллограммы входного и выходного напряжения;
9. Анализ полученных результатов.

3.8. Контрольные вопросы

1. Что называется туннельным эффектом?
2. Расскажите о конструктивных особенностях электронно-дырочных переходов с туннельным эффектом.
3. Как зависит положение энергетического уровня Ферми от степени легирования примесных полупроводников?
4. Какой полупроводник называется «вырожденным» полупроводником?
5. Нарисуйте вольтамперную характеристику идеального электронно-дырочного перехода с туннельным эффектом и объясните ее ход с помощью энергетических (зонных) диаграмм.

6. Назовите основные параметры электронно-дырочного перехода с туннельным эффектом.
7. Нарисуйте и объясните вольтамперную характеристику реального туннельного диода.
8. Что называется избыточным туннельным током? Поясните механизм его образования.
9. Почему электронно-дырочный переход с туннельным эффектом не обладает вентильными свойствами?
10. Поясните влияние температуры окружающей среды на вольт-амперную характеристику реального туннельного диода.
11. Из каких полупроводниковых материалов изготавливаются туннельные диоды и почему?
12. Как зависят основные параметры электронно-дырочного перехода с туннельным эффектом от материала полупроводника и температуры окружающей среды?
13. Укажите области применения туннельных диодов.
14. Нарисуйте энергетическую диаграмму электронно-дырочного перехода с туннельным эффектом в равновесном состоянии, поясните все составляющие токов p - n -перехода и запишите условие равновесия.
15. Нарисуйте схему экспериментальных исследований туннельных диодов, поясните порядок работы и меры обеспечения безопасности экспериментальных исследований.

4. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

4.1. Определение и классификация транзисторов

Транзистором называется электропреобразовательный полупроводниковый прибор с одним или несколькими электрическими переходами, имеющий три или более выводов, способный усиливать и генерировать колебания различных видов [1–11].

Биполярным транзистором называют транзистор, имеющий два близкорасположенных и взаимодействующих электронно-дырочных перехода.

Ток в таких транзисторах переносится двумя типами носителей — дырками и электронами.

Биполярные транзисторы подразделяются на две группы: 1) бездрейфовые биполярные транзисторы, в которых перенос носителей заряда от эмиттера к коллектору через базу осуществляется за счет градиента концентрации; 2) дрейфовые биполярные транзисторы, у которых в базе создается электрическое поле за счет неравномерного внесения примесей вдоль базы, ускоряющее перенос носителей заряда от эмиттера к коллектору.

Биполярные транзисторы классифицируются по обозначению. В соответствии с существующим государственным стандартом они обозначаются буквенно-цифровой кодовой группой. Первый элемент кодового обозначения — цифра или буква, которые определяют материал полупроводника (1 (Г) — германий; 2 (К) — кремний; 3 (А) — арсе-

нид галлия; 4 (И) — индий и его соединения). Второй элемент кодовой группы — буква — обозначает тип транзистора (Т — биполярный транзистор; П — полевой транзистор). Третий элемент кодовой группы — цифра — служит для определения мощности и диапазона рабочих частот транзистора. С четвертого по шестой элементы кодовой группы — цифры — показывают номер разработки транзистора. Седьмой элемент кодовой группы — буква (от А до Я), определяет различие по параметрам группы приборов, выполненных по единой технологии.

4.2. Устройство биполярного транзистора

Биполярный транзистор состоит из пластинки монокристалла полупроводника, имеющей три области с чередующимся типами проводимости. В зависимости от порядка чередования областей различают транзисторы типов $p-n-p$ и $n-p-n$. Физические процессы в транзисторах обоих типов одинаковы, и отличаются они лишь полярностью источников питания и типом носителей зарядов, образующих ток через транзистор [1–4, 9].

Одну из крайних областей транзистора легируют примесями сильнее. Эта область работает, как правило, в режиме инжекции и называется эмиттером. Средняя область слабо легирована примесями и называется базой, а другая крайняя область — коллектором. Коллектор служит для экстракции носителей заряда из базовой области, поэтому по размерам он больше эмиттера. В биполярных транзисторах обычно выполняется условие: $N_{\text{э}} > N_{\text{к}} \gg N_{\text{б}}$; $W = (0,1-0,3) L$.

Электронно-дырочный переход между эмиттером и базой называется эмиттерным переходом, а между коллектором и базой — коллекторным. В нормальном усилительном режиме на эмиттерный переход подается прямое напряжение, на коллекторный — обратное (на рис. 41 приведена схема включения биполярного транзистора $p-n-p$ типа). Носители заряда от эмиттера к коллектору через базу движутся несколько расходящимся пучком, поэтому площадь коллекторного перехода конструктивно выполняется больше площади эмиттерного перехода, чтобы обеспечить наилучшие условия передачи носителей заряда от эмиттера коллектору. Часть базы, которая непосредственно участвует в передаче носителей заряда от эмиттера к коллектору, получила название активной области базы, а часть базы, которая не уча-

ствует в передаче носителей заряда от эмиттера к коллектору, получила название пассивной области базы.

При подаче положительного напряжения на эмиттерный переход транзистора $p-n-p$ высота потенциального барьера эмиттерного перехода понижается, и эмиттер будет инжектировать дырки в базу. Через прямосмещенный эмиттерный переход протекает ток эмиттера $I_{\text{Э}}$:

$$I_{\text{Э}} = I_{\text{Э0}} \left(e^{\frac{U_{\text{ЭБ}}}{\phi_T}} - 1 \right) = I_{\text{Э0}} e^{\frac{U_{\text{ЭБ}}}{\phi_T}} - I_{\text{Э0}}, \quad (53)$$

где $I_{\text{Э0}}$ — дрейфовая составляющая тока; $I_{\text{Э0}} e^{\frac{U_{\text{ЭБ}}}{\phi_T}}$ — диффузионная составляющая тока. Поскольку $U_{\text{ЭБ}} > 0$; то $I_{\text{Э0}} e^{\frac{U_{\text{ЭБ}}}{\phi_T}} \gg I_{\text{Э0}}$ и $I_{\text{Э}} \approx I_{\text{Э0}} e^{\frac{U_{\text{ЭБ}}}{\phi_T}}$.

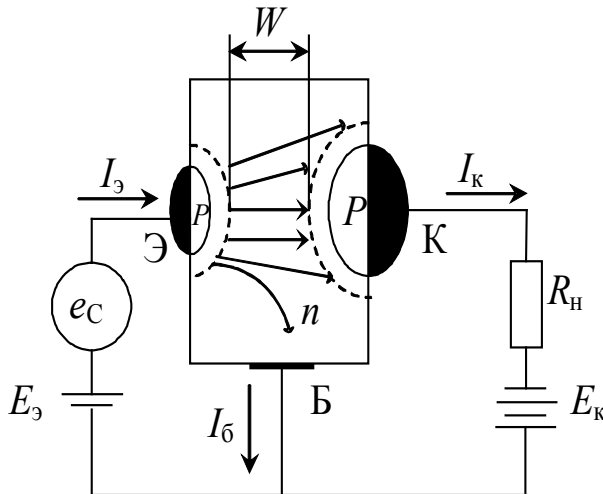


Рис. 41. Схема включения биполярного транзистора $p-n-p$ типа

Диффузионный ток образуется дырками, инжектируемыми из эмиттера в базу, и электронами, переходящими из базы в эмиттер. За счет градиента концентрации дырки диффундируют через область базы к коллектору. В транзисторе толщина базы W значительно меньше диффузионной длины дырок L_p , поэтому большая часть дырок достигает коллекторного перехода. Поскольку на коллектор подается отрицательное напряжение, потенциальный барьер возрастает, и коллектор работает в режиме экстракции. Дырки, дошедшие до коллекторного перехода, увлекаются электрическим полем перехода и создают

ток коллектора I_k , величина которого пропорциональна эмиттерному току $I_{\text{э}}$. Дырочная составляющая эмиттерного тока $I_{\text{э}p}$ протекает по цепи «эмиттер — коллектор — нагрузка» (рис. 32), т. е. участвует в процессе усиления. Электронная же составляющая тока эмиттера $I_{\text{э}n}$ замыкается в цепи «эмиттер — база» и не участвует в процессе усиления. Следовательно, область эмиттера будет тем эффективнее, чем большая часть общего тока через p - n -переход «эмиттер — база» будет переноситься дырками.

4.3. Физические основы работы биполярного транзистора

Для биполярного транзистора p - n - p структуры различают три области (рис. 41): левая область p -типа — эмиттер; средняя область n -типа — база; правая область p -типа — коллектор. Физические процессы в этих областях определяют основу работы биполярного транзистора.

Эмиттер, или эмиттерный электронно-дырочный переход (p - n -переход «эмиттер — база» [5]), как правило, имеет прямое смещение, т. е. напряжение $U_{\text{эб}}$ «эмиттер — база» имеет такую полярность, чтобы p - n -переход находился под прямым смещением. В этом случае эмиттер является источником подвижных носителей тока, и основное назначение эмиттера — инжекция носителей заряда в базу. Ток эмиттера описывается экспоненциальной функцией, справедливой для прямосмещенного p - n -перехода (53). Полное значение тока эмиттера включает дырочную и электронную составляющие. Поскольку $N_{\text{э}} \gg N_{\text{б}}$, то дырочная составляющая тока эмиттера будет много больше электронной составляющей. При этом утверждается, что в транзисторе p - n - p структуры за усилительные свойства ответственна дырочная составляющая тока эмиттера. Основным параметром, который характеризует инжекционную способность эмиттера, является эффективность эмиттера:

$$\gamma = \frac{I_{\text{э}p}}{I_{\text{э}p} + I_{\text{э}n}} = 1 - \frac{\rho_{\text{э}} W}{\rho_{\text{б}} L_p}, \quad (54)$$

где $\rho_{\text{э}}$ и $\rho_{\text{б}}$ — удельные сопротивления эмиттерного и базового слоев полупроводника; W — толщина базы; L_p — длина свободного пробега дырок в базе.

Практически $\rho_{\text{э}} = (0,01 - 0,005)\rho_{\text{б}}$, $W = (0,1 - 0,3)L_p$, поэтому $\gamma \cong 0,99 - 0,999$.

База предназначена для эффективной передачи носителей заряда от эмиттера к коллектору. Дырки, инжектированные эмиттером в базу, за счет градиента их концентрации диффундируют вдоль базы. Для компенсации положительного объемного заряда дырок в базу входят компенсирующие электроны из внешней цепи. Часть дырок рекомбинирует с электронами и рассеивается на неоднородностях в решетке кристалла, не доходя до коллектора. Взамен рекомбинированных электронов в базу входят новые компенсирующие электроны, создающие одну из составляющих тока базы.

Рекомбинационные потери в базе учитываются коэффициентом переноса χ . Коэффициент переноса показывает, какая часть дырок, инжектированных эмиттером, достигает коллекторного перехода:

$$\chi = \frac{I_{\text{кп}}}{I_{\text{эп}}} = 1 - \frac{1}{2} \left[\frac{W}{L_p} \right]^2. \quad (55)$$

Обычно $W = (0,1 - 0,3)L_p$, поэтому $\chi \cong 0,95 - 0,995$. Для увеличения χ коллекторный переход по площади должен быть больше эмиттерного, чтобы собирать большую часть дырок, движущихся от эмиттера к коллектору вдоль базы несколько расходящимся пучком (рис. 41).

Коллектор предназначен для эффективного сбора дырок, диффундируемых вдоль базы и инжектированных эмиттером. Как уже отмечалось, $S_{\text{к}} > S_{\text{э}}$, и это позволяет уменьшить влияние краевых эффектов в базе, увеличивается активная часть базы, уменьшается пассивная часть базы. Кроме этого, увеличение $S_{\text{к}}$ ведет к возрастанию допустимой мощности рассеяния на коллекторном переходе: $P_{\text{к}} = I_{\text{к}} \cdot U_{\text{кб}}$, причем в активном режиме работы биполярного транзистора напряжение «коллектор — база» по модулю много больше напряжения «эмиттер — база», а напряжение пробоя для коллекторного перехода определяется его значением для лавинного пробоя. Через коллекторный переход протекает не только дырочный, но и электронный ток, поэтому можно говорить об эффективности коллекторного перехода, определяемой из соотношения

$$\alpha^* = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{кп}}} = \frac{I_{\text{кп}} + I_{\text{кн}}}{I_{\text{кп}}} > 1. \quad (56)$$

При отсутствии лавинного размножения носителей заряда в коллекторном переходе $\alpha^* \cong 1$.

Произведение трех коэффициентов γ , χ , α^* определяет коэффициент передачи эмиттерного тока в коллектор α или коэффициент передачи по току биполярного транзистора в схеме включения с ОБ:

$$\alpha = \gamma \cdot \chi \cdot \alpha^* = \frac{I_K}{I_\varepsilon}. \quad (57)$$

Практическое применение находят транзисторы, имеющие $\alpha = 0,95 - 0,998$. Таким образом, коллекторный ток почти равен эмиттерному, но напряжение на коллекторном (обратно смещенном) $p-n$ -переходе может быть во много раз больше, чем на эмиттерном, поэтому в транзисторе имеет место усиление сигнала по мощности.

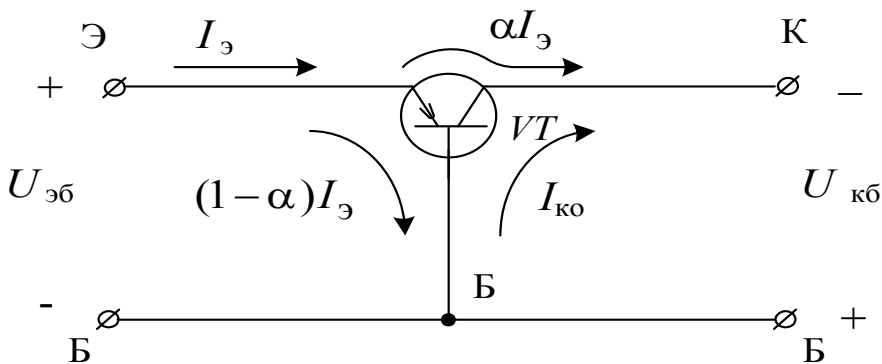


Рис. 42. Диаграмма токов в транзисторе

При разорванной цепи эмиттера ($I_\varepsilon = 0$) через коллекторный переход протекает, как и через обычный, обратно смещенный $p-n$ -переход, ток неосновных носителей заряда, называемый неуправляемым током коллекторного перехода I_{K0} . Этот ток почти не зависит от изменения напряжения на коллекторе, но экспоненциально увеличивается с ростом температуры. Ток I_{K0} замыкается по цепи «база — коллектор», т. е. совпадает по направлению с основным током коллектора и направлен встречно с током базы, вызванным рекомбинационными потерями в базе и электронным током эмиттера (рис. 42).

При некотором токе $I_\varepsilon = I_K + I_B$ в цепи коллектора протекает ток $I_K = \alpha I_\varepsilon + I_{K0}$, а в цепи базы $I_B = (1 - \alpha) I_\varepsilon - I_{K0}$.

4.4. Статические характеристики биполярного транзистора

4.4.1. Общие сведения о статических характеристиках

В схеме включения с ОБ общим электродом для входной и выходной цепей, относительно которого отсчитываются напряжения эмиттера и коллектора, служит база. Цепь эмиттера является входной (управляющей), а цепь коллектора — выходной (управляемой). Соответственно входными параметрами схемы включения биполярного транзистора с ОБ являются ток эмиттера $I_Э$ и напряжение между эмиттером и базой $U_{ЭБ}$, а выходными — ток коллектора $I_К$ и напряжение между коллектором и базой $U_{КБ}$.

Статические характеристики транзистора представляют собой графики зависимостей между постоянными токами, протекающими в цепях электродов транзистора, и постоянными напряжениями, приложенными к электродам ($R_К = 0$).

Для транзисторов в качестве независимых переменных выбирают входной ток и выходное напряжение, а в качестве зависимых — напряжение на входе и выходной ток. Схема с ОБ характеризуется четырьмя семействами статических характеристик:

$I_Э = f(U_{ЭБ})$ при $U_{КБ} = \text{const}$ — входная характеристика;

$I_К = f(U_{КБ})$ при $I_Э = \text{const}$ — выходная характеристика;

$I_К = f(I_Э)$ при $U_{КБ} = \text{const}$ — характеристика прямой передачи по току;

$U_{ЭБ} = f(U_{КБ})$ при $I_Э = \text{const}$ — характеристика обратной передачи по напряжению.

Наибольшее практическое применение находят входные и выходные характеристики.

4.4.2. Входные характеристики биполярного транзистора в схеме включения с общей базой

Входными характеристиками биполярного транзистора в схеме включения с общей базой называются зависимости тока эмиттера от напряжения «эмиттер — база» при постоянном значении напряжения «коллектор — база». Входные характеристики $I_Э = f(U_{ЭБ})|_{U_{КБ} = \text{const}}$

приведены на рис. 43. Входная характеристика при $U_{КБ} = 0$ (зависимость 1, рис. 43) аналогична прямой ветви вольтамперной характеристики полупроводникового диода. Эта характеристика начинается

из начала координат, при увеличении входного напряжения ток эмиттера I_{ε} экспоненциально увеличивается:

$$I_{\varepsilon} = I_{\varepsilon 0} (e^{\frac{U_{\varepsilon Б}}{\varphi_T}} - 1) \cong I_{\varepsilon 0} \cdot e^{\frac{U_{\varepsilon Б}}{\varphi_T}}. \quad (58)$$

Однако при больших токах I_{ε} входные характеристики близки к линейным. Наклон линейного участка определяется в основном объемным сопротивлением базы r_B .

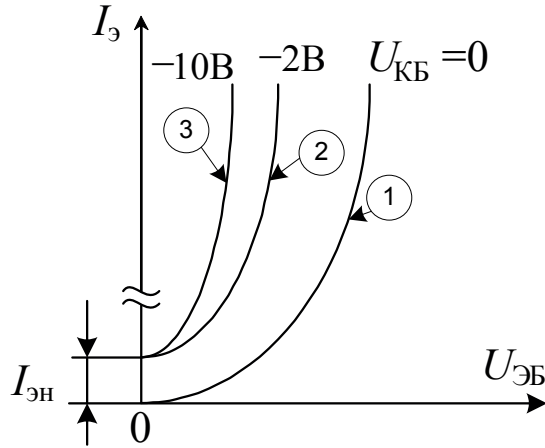


Рис. 43. Семейство входных характеристик

При напряжении $|U_{КБ}| > 0$ (зависимости 2, 3, рис. 43) кривые смещаются вверх относительно начала координат и к оси токов. Смещение характеристик вверх относительно начала координат объясняется падением напряжения на объемном сопротивлении базы r_B при протекании тока $I_{К0}$ (рис. 44).

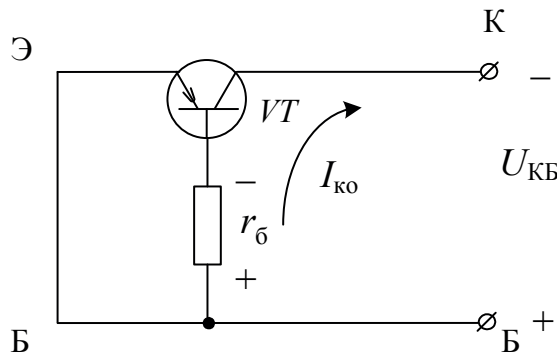


Рис. 44. Схема включения транзистора при $U_{\varepsilon Б} = 0$

При отрицательном напряжении на коллекторе через коллекторный переход протекает ток обратносмещенного p - n -перехода I_{K0} , а так как база мало легирована примесями, то на r_b будет создаваться падение напряжения $U_{r_b} = I_{K0} \cdot r_b$, в результате чего эмиттер получает положительное смещение относительно базы и начинает инжектировать дырки, что приводит к появлению начального тока эмиттера $I_{ЭН} = I_{Э0} \left[\exp \left\{ \frac{U_{r_b}}{\Phi_T} \right\} - 1 \right]$ при $U_{ЭБ} = 0$. Смещение характеристик влево при увеличении коллекторного напряжения объясняется эффектом модуляции толщины базы. Эффект модуляции заключается в изменении толщины базы при изменении напряжения на коллекторе.

На эмиттерный переход напряжение подается в прямом направлении, и оно мало изменяется при работе транзистора, поэтому эмиттерный переход узкий и ширина его изменяется незначительно. Коллекторный переход смещен в обратном направлении, поэтому его ширина больше и изменяется в широких пределах при изменении напряжения на коллекторе. А так как в биполярных транзисторах $\rho_b \gg \rho_k$, то коллекторный переход расширяется в основном в область базы, уменьшая ее толщину:

$$W = W_0 - I_{K0} \sqrt{\frac{|U_{KB}|}{\Phi_k}}, \quad (59)$$

где I_{K0} — ширина коллекторного перехода в равновесном состоянии; W_0 — толщина базы в равновесном состоянии.

Эффект модуляции толщины базы обуславливает наличие обратной связи, характеризующей влияние коллекторного перехода на эмиттерный переход из-за их близкого расположения.

Для пояснения физической сути обратной связи на рис. 45 показано изменение распределения избыточной концентрации дырок в базе с увеличением коллекторного напряжения (пунктирная линия) при фиксированных значениях напряжения на эмиттере переходе (рис. 45, *а*) и тока эмиттера (рис. 45, *б*). На рис. 45 ΔP_0 — избыточная концентрация дырок в базе на границе эмиттерного перехода. Избыточная концентрация дырок зависит от величины приложенного напряжения к эмиттерному переходу. Чем выше прямое напряжение «эмиттер — база», тем больше концентрация дырок в базе у эмиттерного перехода, тем больше градиент концентрации дырок в базе. По-

сколько диффузионный ток эмиттера зависит от градиента концентрации дырок в базе $\frac{\partial P}{\partial X}$: $I_{\text{Э}} = -eSD_p \frac{dP}{dX}$, то при постоянном напряжении на эмиттерном переходе и с увеличением по модулю напряжения на коллекторе возрастает градиент концентрации, а следовательно, и ток эмиттера.

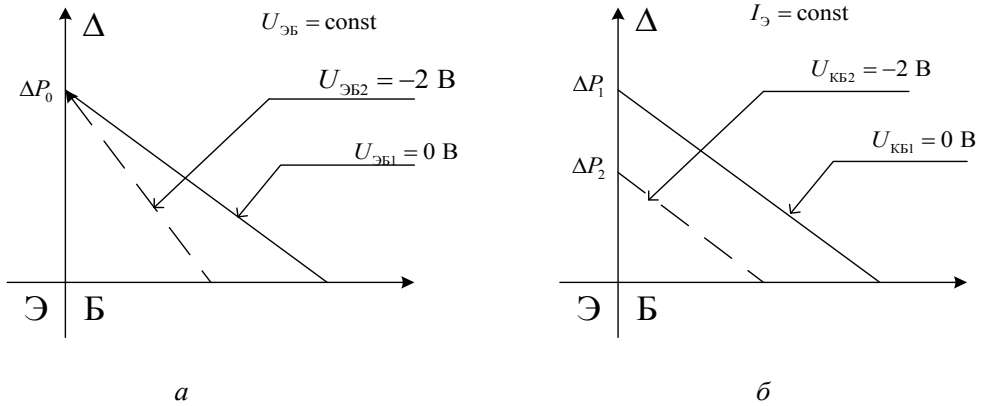


Рис. 45. Влияние $U_{\text{КБ}}$ на распределение избыточной концентрации дырок в базе

На рис. 45, б показано влияние $U_{\text{КБ}}$ на распределение дырок в базе, если поддерживать постоянной величину тока эмиттера. С увеличением $U_{\text{КБ}}$ (по модулю) толщина базы уменьшается. Чтобы ток эмиттера оставался постоянным, необходимо, чтобы с изменением $U_{\text{КБ}}$ градиент концентрации оставался неизменным. Поэтому с увеличением $U_{\text{КБ}}$ должна уменьшиться избыточная концентрация дырок на границе эмиттерного перехода ($\Delta P_2 < \Delta P_1$). А это может быть достигнуто лишь путем уменьшения входного напряжения $U_{\text{ЭБ}}$.

Уменьшение $U_{\text{ЭБ}}$ с ростом напряжения $U_{\text{КБ}}$ (по модулю) оценивают коэффициентом обратной связи по напряжению $\mu_{\text{ЭК}}$:

$$\mu_{\text{ЭК}} = \left. \frac{dU_{\text{ЭБ}}}{dU_{\text{КБ}}} \right|_{I_{\text{Э}} = \text{const}} \cdot \quad (60)$$

Наиболее существенный сдвиг характеристик имеет место при малых $U_{\text{КБ}}$. При $|U_{\text{КБ}}| > (3-5)$ В характеристика смещаются незначительно, так как ширина коллекторного перехода, а следовательно, и толщина базы зависят от коллекторного напряжения не по линейному закону (59).

Входные характеристики кремниевого транзистора (рис. 46, *а*) смещены от начала координат в сторону больших прямых напряжений. Как и у кремниевого диода, это смещение равно $\cong 0,5$ В и объясняется тем, что контактная разность потенциалов у кремниевых транзисторов больше, чем у германиевых.

Входные характеристики германиевых транзисторов при различных температурах окружающей среды приведены на рис. 46, *б*. С увеличением температуры входной ток увеличивается, входная характеристика смещается влево (примерно на $(1-2)$ мВ/°С) вследствие роста внутренней энергии основных носителей заряда и уменьшения контактной разности потенциала $\phi_{кэ}$, а следовательно, и потенциального барьера. Изменение начального тока эмиттера с ростом температуры окружающей среды связано с экспоненциальной зависимостью от температуры неуправляемого тока коллекторного перехода.

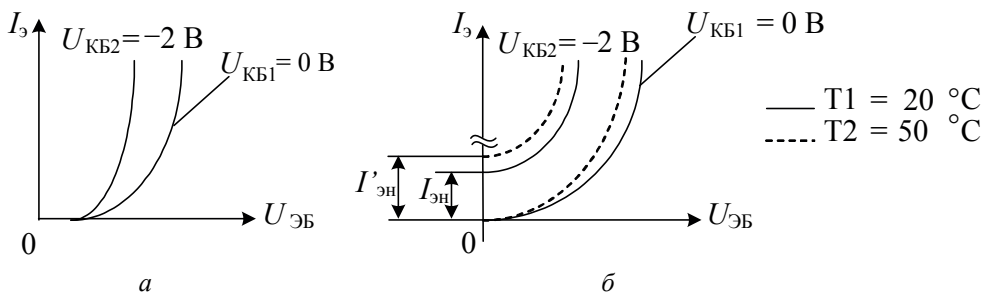


Рис. 46. Входные характеристики биполярных транзисторов:

а — входные характеристики кремниевого транзистора; *б* — входные характеристики при комнатной и повышенной температурах германиевого транзистора

С увеличением тока $I_{к0}$ возрастает падение напряжения на объемном сопротивлении базы, и это приводит к росту начального тока эмиттерного перехода.

4.4.3. Семейство выходных характеристик

Выходными характеристиками биполярного транзистора в схеме включения с общей базой называются зависимости тока коллектора от напряжения «коллектор — база» при постоянном токе эмиттера.

Выходные характеристики $I_K = f(U_{кб})|_{I_э = \text{const}}$ приведены на рис. 47.

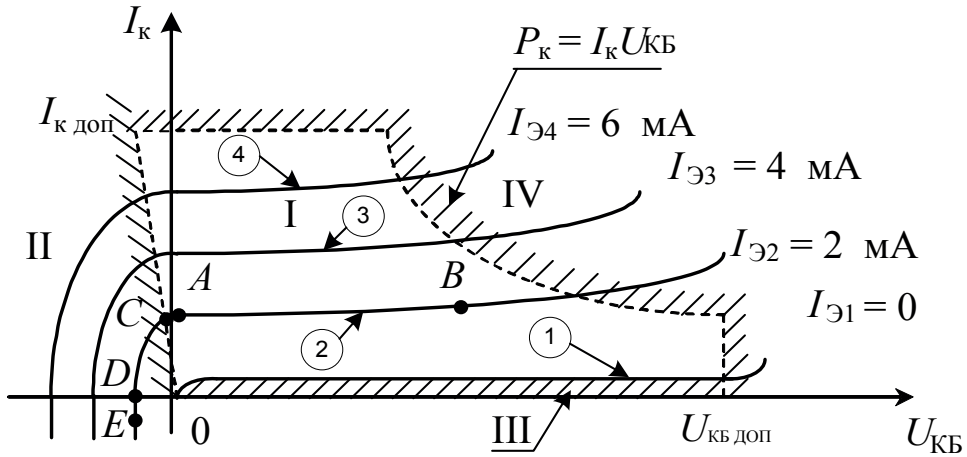


Рис. 47. Семейство выходных характеристик

Выходные характеристики в основном режиме работы биполярного транзистора в схеме включения с общей базой описываются соотношением

$$I_K = \alpha \cdot I_{\text{Э}} + I_{K0}. \quad (61)$$

При токе эмиттера, равном нулю ($I_{\text{Э}} = 0$), зависимость $I_K = f(U_{KБ})$ представляет собой характеристику обратносмещенного p - n -перехода [7] (зависимость 1, рис. 47). В этом случае в цепи коллектора протекает ток $I_{K0} = I_0 + I_{\text{т/г}} + I_y$, где I_0 — тепловой ток или ток насыщения; $I_{\text{т/г}}$ — ток термогенерации; I_y — ток утечки.

При токе эмиттера больше нуля ($I_{\text{Э}} > 0$) (зависимости 2–4, рис. 47) характеристика смещается вверх и влево относительно начала координат. При $U_{KБ} = 0$ (рис. 48) на объемном сопротивлении базы создается падение напряжения $U_{\text{тб}} = (1 - \alpha)I_{\text{Э}}r_{\text{б}}$ за счет тока рекомбинационных потерь базы $(1 - \alpha)I_{\text{Э}}$, коллекторный переход оказывается обратносмещенным и работает в режиме экстракции. Ввиду этого для тока коллектора справедливо соотношение (61) и выходная характеристика транзистора соответствует точке А (зависимость 2, рис. 47).

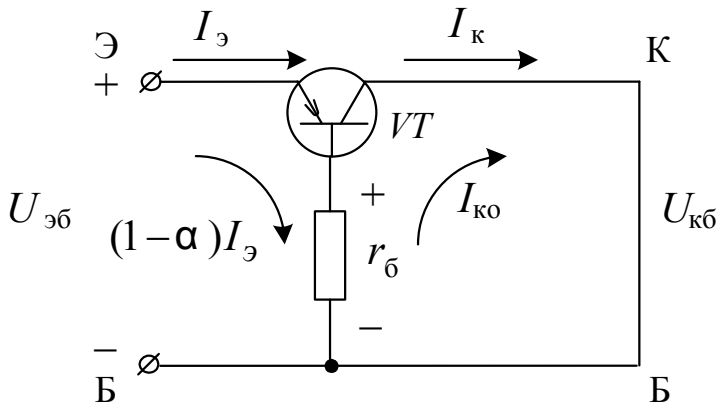


Рис. 48. Схема включения транзистора при $U_{кб} = 0$

При увеличении обратного напряжения на коллекторном переходе ток коллектора на участке AB несколько возрастает за счет тока $I_{к0}$ и увеличения коэффициента передачи тока α , вызванного эффектом модуляции толщины базы:

$$\alpha \cong 1 - \frac{1}{2} \left[\frac{W}{L} \right]^2. \quad (62)$$

С ростом $|U_{кб}|$ уменьшается толщина базы W , увеличивается коэффициент переноса, а следовательно, и α (62).

При подаче на коллекторный переход прямого напряжения коллектор сам инжектирует дырки в область базы, так как этот ток течет навстречу току инжекции из эмиттера, то результирующий ток в цепи коллектора с ростом прямого напряжения уменьшается. В точке C выходной характеристики при токе $I_{э2}$ (рис. 47) переход «коллектор — база» имеет нулевое смещение (в этой точке напряжение «коллектор — база» равно падению напряжения на объемном сопротивлении базы и суммарное напряжение на переходе равно нулю, поэтому неуправляемый ток коллекторного перехода отсутствует и общий ток коллектора определяется первым слагаемым выражения (61)). При дальнейшем увеличении прямого напряжения на коллекторном переходе его ток инжекции быстро возрастает, противодействуя току коллектора экстракции, и общий ток уменьшается до нуля (точка D на рис. 47). Чем больше ток эмиттера, тем выше и левее смещается выходная характеристика (зависимости 3, 4, рис. 47).

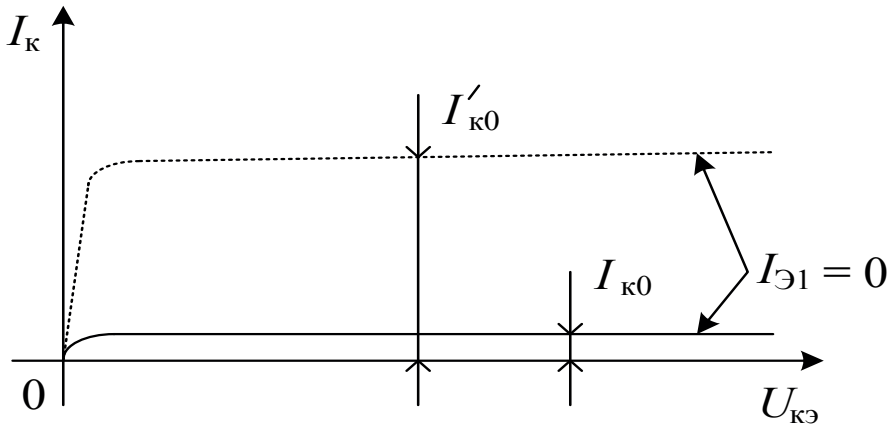


Рис. 49. Влияние температуры на выходные характеристики биполярного транзистора в схеме включения с общей базой при $I_{Э1} = 0$:

———— $T_1 = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$; - - - - - $T_2 = +50\text{ }^{\circ}\text{C}$

Увеличение напряжения на коллекторе выше некоторого допустимого значения приводит к резкому увеличению тока коллектора вследствие лавинного размножения носителей заряда в коллекторном переходе из-за разогрева коллекторного перехода за счет рассеиваемой на нем мощности $P_K = I_K U_K$. Область характеристик при $|U_K| > |U_{K\text{доп}}|$ и $P_K > P_{K\text{доп}}$ (область IV, рис. 47) является нерабочей, так как в этой области происходит выход из строя транзистора. Область характеристик при токе $I_K < I_{K0}$ называется режимом отсечки (область III). В этой области коллекторный и эмиттерный переходы обратны смещены. Область характеристик при положительном напряжении на коллекторе (область II) называется режимом насыщения. В этой области коллекторный и эмиттерный переходы прямо смещены. Область I называется режимом активного усиления — эмиттерный переход, прямосмещенный, а коллекторный — обратносмещенный. В этой области транзистор работает в усилительном режиме. На рис. 47 пунктирной линией, выходящей из начала координат под некоторым углом, отмечается граница активного режима работы транзистора и режима насыщения.

При работе в импульсном режиме транзистор находится в основном в режиме насыщения или режиме отсечки.

Влияние температуры на выходные характеристики биполярного транзистора в схеме включения с общей базой можно пояснить следующим образом. При $I_{Э1} = 0$ (разрыв цепи эмиттера) исходная характеристика соответствует обратной ветви вольтамперной характеристики электронно-дырочного перехода:

$$I_{\text{ОБР}} = I_{K0} \left[1 - \exp\left(\frac{-|U_{\text{КБ}}|}{\varphi_T}\right) \right]. \quad (63)$$

Данная зависимость представлена на рис. 40 сплошной линией при температуре $T1 = +20^\circ\text{C}$.

При увеличении температуры возрастет ток I_{K0} . Ток I_{K0} , так же как и обратный ток электронно-дырочного перехода [7], растет по экспоненциальному закону. На практике он примерно удваивается при изменении температуры на каждые 10°C (пунктирная линия на рис. 49).

Температурная зависимость выходных характеристик при токах эмиттера больше нуля ($I_{Э} > 0$) показана на рис. 50. При увеличении температуры возрастает ток коллектора в соответствии с соотношением (61) из-за увеличения тока I_{K0} и коэффициента передачи по току α .

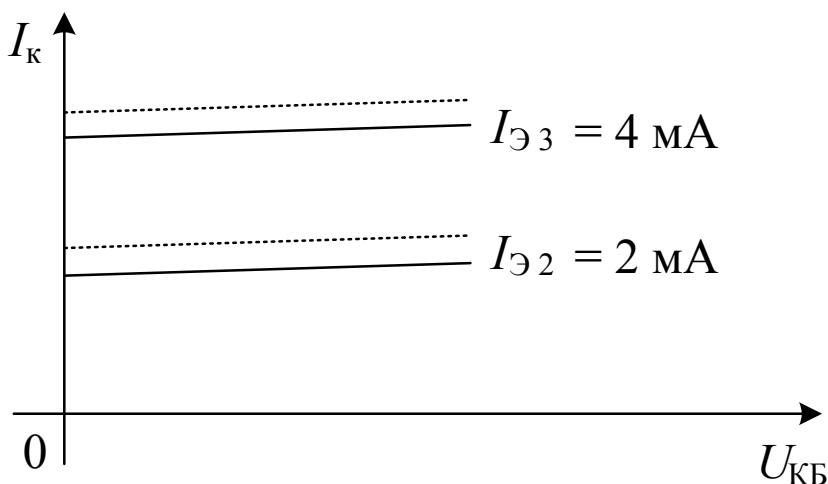


Рис. 50. Влияние температуры на выходные характеристики биполярного транзистора в схеме включения с общей базой при $I_{Э} > 0$:
 ————— $T1 = +20^\circ\text{C}$; ————— $T2 = +50^\circ\text{C}$

На рис. 50 выходные характеристики приведены только для активного режима работы, поскольку этот режим наиболее часто используется в практических применениях. Из приведенных зависимостей

следует, что с ростом температуры увеличение I_{K0} и α приводит к росту тока коллектора и все зависимости поднимаются вверх (пунктирные линии выходных характеристик, рис. 50)

Поскольку ток I_{K0} мал, а α с ростом температуры растет незначительно, то изменение температуры в широких пределах приводит к незначительному изменению характеристик, поэтому выходные характеристики транзистора в схеме включения с ОБ можно считать термостабильными. Слабая зависимость выходных характеристик биполярного транзистора в схеме включения с общей базой в активном режиме работы от напряжения «коллектор — база» отражает их линейность.

4.5. H-параметры биполярного транзистора в схеме включения с общей базой

Параметры транзистора устанавливают связь между переменными составляющими токов в выводах транзистора и переменными напряжениями на электродах в выбранной рабочей точке.

При работе транзистора с сигналами малых амплитуд транзистор можно представить активным линейным четырехполюсником. Параметры четырехполюсника измеряются на переменном токе и являются дифференциальными. Наибольшее применение нашла смешанная система H-параметров. В этой системе параметры измеряются в режиме холостого хода на входе и в режиме короткого замыкания на выходе (по переменному току), т. е. в режимах, которые легко осуществить на практике. Независимыми переменными в этой системе являются ток на входе I_1 и напряжение на выходе U_2 , а функциями — напряжение на входе U_1 и ток на выходе I_2 . Система уравнений четырехполюсника имеет вид

$$\begin{cases} dU_1 = H_{11}dI_1 + H_{12}dU_2, \\ dI_2 = H_{21}dI_1 + H_{22}dU_2. \end{cases} \quad (64)$$

Параметры H_{11} и H_{21} измеряются в режиме короткого замыкания на выходе, а H_{12} и H_{22} измеряются в режиме холостого хода на выходе. Для схемы включения с ОБ входной ток $I_1 = I_{\text{Э}}$, а выходной ток $I_2 = I_{\text{К}}$; входное напряжение $U_1 = U_{\text{ЭБ}}$ и выходное напряжение $U_2 = U_{\text{КБ}}$, тогда

$$\bullet \quad H_{11\text{Б}} = \frac{\partial U_{\text{ЭБ}}}{\partial I_{\text{Э}}} = \frac{\Delta U_{\text{ЭБ}}}{\Delta I_{\text{Э}}} \Big|_{U_{\text{КБ}} = \text{const}} \quad (65)$$

— входное сопротивление, определяемое как отношение изменения напряжения «эмиттер — база» к изменению тока эмиттера при постоянном значении напряжения «коллектор — база» (не равном нулю);

$$\bullet \quad H_{12Б} = \frac{\partial U_{ЭБ}}{\partial I_{Э}} = \frac{\Delta U_{ЭБ}}{\Delta I_{Э}} \Big|_{I_{К} = \text{const}} \quad (66)$$

— коэффициент обратной связи по напряжению, который определяется отношением изменения напряжения «эмиттер — база» к изменению напряжения «коллектор — база» при постоянном токе эмиттера;

$$H_{21Б} = \frac{\partial I_{К}}{\partial I_{Э}} = \frac{\Delta I_{К}}{\Delta I_{Э}} \Big|_{U_{КБ} = \text{const}} \quad (67)$$

— коэффициент передачи по току, который определяется как отношение изменения тока коллектора к изменению тока эмиттера при постоянном значении напряжения «коллектор — база»;

$$\bullet \quad H_{22Б} = \frac{\partial I_{К}}{\partial U_{КБ}} = \frac{\Delta I_{К}}{\Delta U_{КБ}} \Big|_{I_{Э} = \text{const}} \quad (68)$$

— выходная проводимость, определяемая отношением изменения тока коллектора к изменению напряжения «коллектор — база» при постоянном токе эмиттера.

H -параметры могут быть измерены на малом сигнале в рабочей точке с помощью специальных приборов либо определены:

а) методом двух отсчетов при снятии входных и выходных характеристик транзистора в лаборатории;

б) графически по семейству входных и выходных характеристик, как показано на рис. 51.

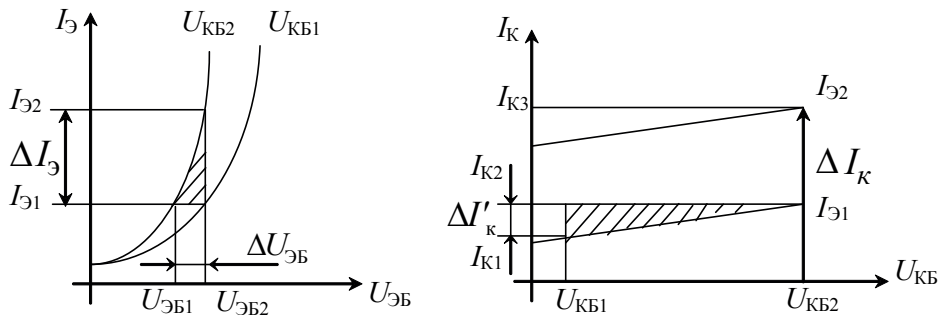


Рис. 51. Определение H -параметров

$$H_{11Б} = \frac{\Delta U_{ЭБ}}{\Delta I_{Э}} \Big|_{U_{КБ} = \text{const}} = \frac{U_{ЭБ2} - U_{ЭБ1}}{I_{Э2} - I_{Э1}} \Big|_{U_{КБ2}}, \quad (69)$$

$$H_{12Б} = \left. \frac{\Delta U_{ЭБ}}{\Delta U_{КБ}} \right|_{I_Э = \text{const}} = \frac{U_{ЭБ2} - U_{ЭБ1}}{U_{КБ2} - U_{КБ1}} \Big|_{I_{Э1}}, \quad (70)$$

$$H_{21Б} = \left. \frac{\Delta I_К}{\Delta I_Э} \right|_{U_{КБ} = \text{const}} = \frac{I_{К3} - I_{К2}}{I_{Э2} - I_{Э1}} \Big|_{U_{КБ2}}, \quad (71)$$

$$H_{22Б} = \left. \frac{\Delta I_К}{\Delta U_{КБ}} \right|_{I_Э = \text{const}} = \frac{I_{К2} - I_{К1}}{U_{КБ2} - U_{КБ1}} \Big|_{I_{Э1}}. \quad (72)$$

4.6. Эквивалентные Т-образные схемы биполярного транзистора в схеме включения с общей базой

4.6.1. Т-образная эквивалентная схема транзистора на низких частотах

При анализе электрических схем нелинейные элементы заменяют их математической моделью, которая максимально точно отражает работу нелинейного элемента в реальных условиях. Эквивалентная схема является графическим отображением математической модели нелинейного элемента.

В качестве эквивалентной схемы биполярного транзистора часто используют Т-образные схемы замещения. Такая Т-образная эквивалентная схема биполярного транзистора в схеме включения с общей базой для области нижних частот представлена на рис. 52, на котором области биполярного транзистора заменены соответствующими резисторами, а генератор тока $\alpha I_Э$ отражает эффект передачи тока эмиттера в коллекторную область.

На рис. 52 обозначено: $r_э$ — сопротивление области эмиттера, определяемое из соотношения, Ом:

$$r_э \cong \frac{\phi_T}{I_э} = \frac{25 \text{ (мВ)}}{I_э \text{ (мА)}}, \quad (73)$$

где $\phi_T = \frac{kT}{e}$ — температурный потенциал, при комнатной температуре $T \cong 300 \text{ К}$ он равен $\phi_T \cong 25 \text{ мВ}$; $r_б$ — объемное сопротивление области базы, определяемое из соотношения

$$r_б \cong \frac{\rho_б}{4\pi W}, \quad (74)$$

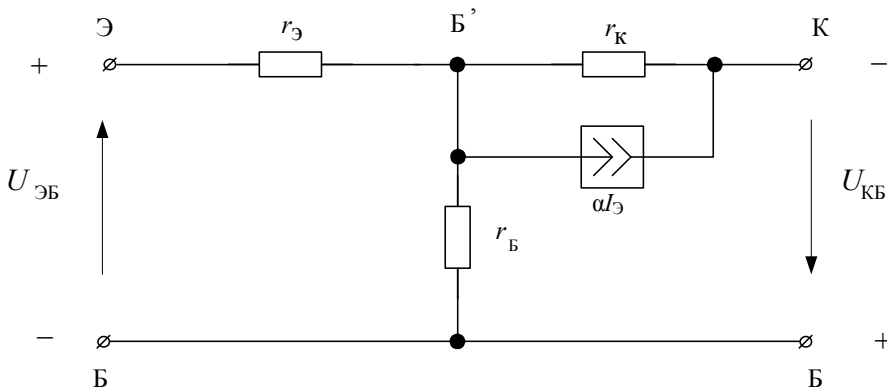


Рис. 52. Т-образная эквивалентная схема биполярного транзистора на низких частотах

где ρ_B — удельное электрическое сопротивление области базы, и оно определяется для транзистора $p-n-p$ -структуры выражением: $\rho_B e \mu_n n_n$; W — толщина базы; r_K — сопротивление коллекторного перехода, которое находится из выражения

$$r_K = \left. \frac{dU_{KB}}{dI_K} \right|_{I_3 = \text{const}} \quad (75)$$

и по физическому смыслу представляет собой сопротивление перехода «коллектор — база» переменному току. Точка Б' на рис. 52 отображает внутреннюю точку базы без учета объемного сопротивления r_B .

4.6.2. Т-образная эквивалентная схема транзистора на высоких частотах

При анализе электрических схем в области высоких частот нельзя пренебрегать инерционными свойствами биполярного транзистора и емкостями переходов «коллектор — база», «эмиттер — база». Поэтому при рассмотрении биполярного транзистора в схеме включения с общей базой в области высоких частот Т-образная эквивалентная схема трансформируется к виду, представленному на рис. 53. В этом случае частотные свойства перехода «эмиттер — база» учитываются введением емкости $C_3 = C_{эд} + C_{эб}$, где $C_{эд}$ — диффузионная емкость перехода «эмиттер — база», играющая основную роль при работе эмиттерного перехода в прямом включении; $C_{эб}$ — барьерная емкость перехода «эмиттер — база», которая определяет величину C_3 при обратном смещении эмиттерного перехода.

На рис. 53 емкость C_K определяется барьерной емкостью перехода «коллектор — база», так как коллекторный переход имеет обратное смещение. Величина C_K определяется по формуле

$$C_K = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S_K}{l_K(U_{KB})} \quad (76)$$

и зависит от модуля напряжения U_{KB} , это связано с зависимостью ширины перехода «коллектор — база» от напряжения U_{KB} :

$$l_K(U_{KB}) \cong l_{K0} \left[\frac{|U_{KB}|}{\varphi_{KК}} \right]^{1/2}, \quad (77)$$

где l_{K0} — равновесная ширина электронно-дырочного перехода при $U_{KB} = 0$; $\varphi_{KК}$ — контактная разность потенциалов перехода «коллектор — база»; S_K — площадь коллекторного перехода.

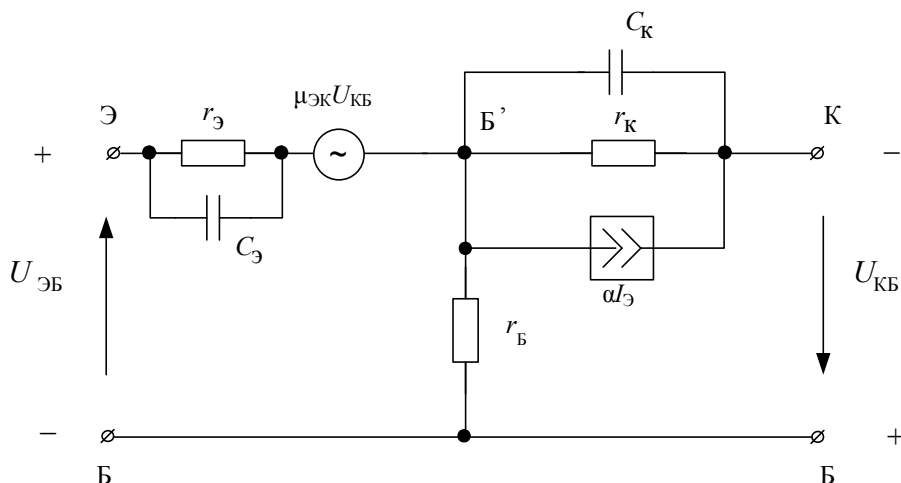


Рис. 53. Т-образная эквивалентная схема биполярного транзистора в схеме включения с общей базой на высоких частотах

На рис. 53 введен генератор напряжения $\mu_{ЭК} U_{KB}$, который отражает наличие внутренней обратной связи в транзисторе. Величина $\mu_{ЭК}$ является коэффициентом обратной связи по напряжению и в соответствии с эффектом модуляции толщины базы находится из выражения

$$\mu_{ЭК} = \left. \frac{dU_{ЭК}}{dU_{KB}} \right|_{I_Э = \text{const}} \cong (10^{-3} - 10^{-4}). \quad (78)$$

Остальные элементы рис. 53 были определены ранее.

Параметры Т-образной эквивалентной схемы биполярного транзистора в схеме включения с общей базой связаны с соответствующими H -параметрами следующими соотношениями:

$$\alpha = -H_{21Б}; \quad (79)$$

$$\mu = -H_{12Б}; \quad (80)$$

$$r_k = \frac{1}{H_{22Б}}; \quad (81)$$

$$r_Б = \frac{H_{12Б}}{H_{22Б}}; \quad (82)$$

$$r_Э = H_{11Б} - (1 - |H_{21Б}|) \frac{H_{12Б}}{H_{22Б}}; \quad (83)$$

$$S = \frac{H_{21Б}}{H_{11Б}}. \quad (84)$$

4.7. Лабораторное задание № 4

«Исследование характеристик и параметров биполярного транзистора в схеме включения с общей базой»

Цель работы

Ознакомиться с физическими свойствами работы биполярного транзистора, исследовать характеристики и параметры транзистора в схеме включения с общей базой и изучить влияние температуры окружающей среды на ход характеристик.

1. Записать паспортные параметры исследуемого транзистора и зарисовать схему расположения его выводов.

2. Рассчитать и построить кривую допустимой мощности, рассеиваемой транзистором.

3. Собрать схему для исследования транзистора в схеме включения с ОБ (рис. 54).

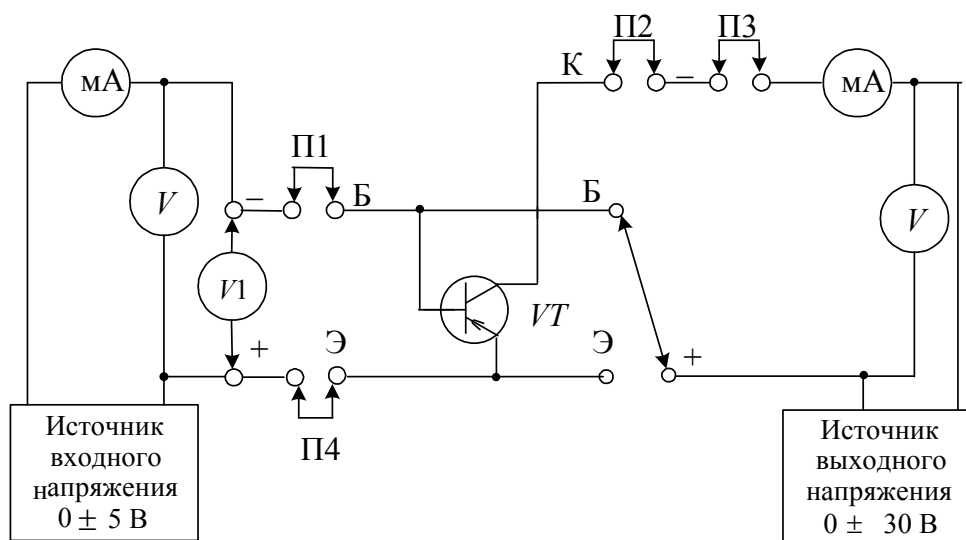


Рис. 54. Схема лабораторной установки

Прибор (мА) источника входного напряжения измеряет ток эмиттера ($I_{\text{Э}}$), а вольтметр (V) служит для измерения входного напряжения транзистора ($U_{\text{ЭБ}}$).

В выходной цепи прибор (мА) измеряет ток коллектора ($I_{\text{К}}$), а вольтметр V — напряжение между коллектором и базой ($U_{\text{КБ}}$).

Для повышения точности измерения входного напряжения во входную цепь целесообразно включить цифровой вольтметр ($V1$), а выходную цепь цифровой миллиамперметр.

4. Снять семейство входных характеристик $I_{\text{Э}} = f(U_{\text{ЭБ}}) \Big|_{U_{\text{КБ}} = \text{const}}$

для трех значений напряжения на коллекторе $U_{\text{КБ}} = 0, -2 \text{ В}, -10 \text{ В}$ при комнатной температуре. При снятии входных характеристик задаваться током эмиттера и отмечать напряжение на эмиттере. Для удовлетворительного воспроизведения хода характеристик необходимо измерить не менее 7–9 точек, причем их максимальное число должно приходиться на самый нелинейный участок характеристики (табл. 9).

Таблица 9

	$I_{\text{Э}}, \text{мА}$									
	0	0,1	0,3	0,5	1	2	4	6	8	10
$U_{\text{ЭБ}}, \text{В}$ $T_1 = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$										
$U_{\text{ЭБ}}, \text{В}$ $T_2 = +50\text{ }^{\circ}\text{C}$										

5. Снять семейство выходных характеристик $I_{\text{К}} = f(U_{\text{КБ}}) \big|_{I_{\text{Э}} = \text{const}}$

для четырех значений тока эмиттера $I_{\text{Э}} = 0, 4, 6, 8 \text{ мА}$ при комнатной температуре. Выходные характеристики биполярного транзистора исследуются лишь в активном режиме его работы. При экспериментальных исследованиях необходимо поддерживать ток эмиттера постоянным и не допускать превышения максимально-допустимых значений тока коллектора $I_{\text{К МАКС}}$, напряжения коллектор-эмиттер $U_{\text{КЭДОП}}$ и мощности $P_{\text{К МАКС}}$. При этом следует использовать построенную ранее в п. 2 зависимость допустимой мощности $P_{\text{К МАКС}}$, рассеиваемой коллектором биполярного транзистора. Чтобы снять выходную характеристику при токе $I_{\text{Э}} = 0$, разомкнуть перемычку П4.

При снятии характеристик при $I_{\text{Э}} > 0$ в рабочем режиме ($U_{\text{КБ}} \geq |2| \text{ В}$) вместо перемычек П2 и П4 поставить цифровые приборы в режиме измерения тока.

6. Исследуемый транзистор поместить в печь, предварительно разогрев до температуры $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Через 5 минут повторить пункты 4, 5.

Обработка результатов эксперимента

1. По построенным характеристикам транзистора, снятых при комнатной температуре, определить $H_{\text{б}}$ -параметры. При определении $H_{\text{б}}$ -параметров режимы работы на входных и выходных характеристиках выбирать приблизительно одинаковыми. Расчет H -параметров проводить с использованием соотношений (69)–(72).

2. По вычисленным $H_{\text{б}}$ -параметрам подсчитать параметры Т-образной эквивалентной схемы по формулам (79)–(84).

3. Справочные и расчетные значения параметров свести в табл. 10.

4. Используя входную характеристику по данным эксперимента при $U_{\text{КБ}} = -10 \text{ В}$ и комнатной температуре, рассчитать и построить график зависимости $H_{11\text{Б}} = f(I_{\text{Э}})$.

Таблица 10

	Параметры									
	$h_{11б}$	$h_{12б}$	$h_{21б}$	$h_{22б}$	$r_э$	$r_б$	$r_к$	α	μ	S
Размерность										
Паспортные значения										
Расчетные значения										

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Формулировку цели исследования;
2. Схему лабораторной установки для исследования транзистора;
3. Таблицы результатов измерений;
4. Графики семейства входных характеристик при комнатной и повышенной температурах;
5. Графики семейства выходных характеристик при комнатной и повышенной температурах. На выходных характеристиках построить кривую допустимой мощности рассеяния исследованного транзистора;
6. На графиках входных и выходных характеристик транзистора, полученных при комнатной температуре показать области определения H_6 -параметров;
7. График зависимости $H_{11б} = f(I_э)$ при $U_{кб} = -10$ В;
8. Таблицу со справочными и расчетными параметрами;
9. Анализ полученных результатов.

4.8. Связь между токами биполярного транзистора в схеме включения с общим эмиттером

В данной схеме включения общим электродом выступает эмиттер. Входным электродом является база, а выходным — коллектор. В схеме включения с ОЭ входной сигнал подводится к участку база-эмиттер транзистора, а снимается с участка коллектор-эмиттер, входным током является ток базы $I_б$, а выходным — ток коллектора $I_к$ (рис. 55) [1–10]. Схема включения биполярного транзистора рис. 55 соответствует его активному режиму работы.

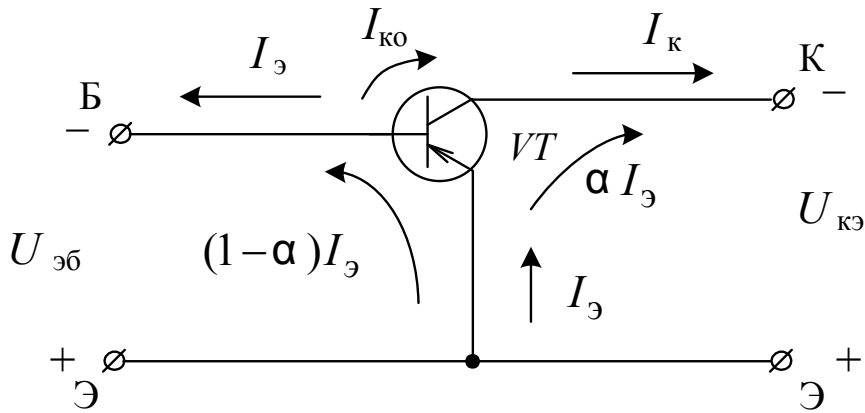


Рис. 55. Диаграмма токов в транзисторе

Токи, протекающие в выводах транзистора, и все физические процессы в транзисторе не изменяются при изменении схемы его включения, следовательно, при протекании в цепи эмиттера тока $I_э$ в выводах коллектора и базы протекают токи:

$$I_K = \alpha I_э + I_{K0}; \quad (85)$$

$$I_B = (1 - \alpha) I_э - I_{K0}. \quad (86)$$

Поскольку $I_K > I_B$, то транзистор в схеме включения с ОЭ усиливает не только по напряжению, но и по току. Коэффициент усиления по току определяется из соотношения:

$$\beta = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \right|_{U_K} = \frac{\alpha \Delta I_э}{(1 - \alpha) \Delta I_э} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}. \quad (87)$$

В выражении (87) $\beta > 1$, если $\alpha > 0,5$. Практическое применение находят транзисторы, имеющие $\alpha = 0,9 - 0,995$, в этом случае $\beta = 10 - 200$.

Для транзистора в схеме с ОЭ важно знать зависимость между выходными и входными токами.

Используя выражение $I_K = \alpha I_э + I_{K0}$, а $I_э = I_K + I_B$, находим, что $I_K = \alpha I_K + \alpha I_B + I_{K0}$, $I_K (1 - \alpha) = \alpha I_B + I_{K0}$. Отсюда получаем:

$$I_K = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_B + \frac{1}{1 - \alpha} I_{K0} = \beta I_B + (1 + \beta) I_{K0}. \quad (88)$$

Таким образом, ток коллектора определяется выражением:

$$I_K = \beta I_B + (1 + \beta) I_{K0}. \quad (89)$$

При $I_B = 0$ (обрыв базы) в цепи «коллектор — эмиттер» протекает ток, называемый сквозным током транзистора $I_{K0}^* = (\beta + 1) I_{K0}$. Усиление неуправляемого тока коллекторного перехода I_{K0} в $(\beta + 1)$ раз объясняется наличием положительной обратной связи в транзисторе с оборванной базой.

Сущность этого явления заключается в том, что дырки, генерируемые в области коллекторного перехода, уходят в коллектор, а электроны остаются в базе. В базе скапливается отрицательный объемный заряд, который не может выйти из базы в виде тока, так как вывод базы оборван.

В этом случае поле отрицательных объемных зарядов в базе воздействует на эмиттерный переход, снижая высоту его потенциального барьера, что приводит к увеличению инжекции дырок из эмиттера в базу. Некоторая часть инжектированных дырок рекомбинирует с электронами в базе, уменьшая накопленный заряд, но большая их часть проходит область базы и втягивается электрическим полем коллекторного перехода в коллектор, увеличивая ток коллектора.

Равновесие устанавливается в том случае, когда неравновесные электроны открывают путь в базу в $(\beta + 1)$ раз большему количеству дырок. Физические процессы, аналогичные вышеописанным, происходят и при включении в цепь базы большого сопротивления. Сквозной ток транзистора влияет на физику работы биполярного транзистора. Особенно это влияние проявляется в биполярных транзисторах, выполненных на основе полупроводникового материала германия. Сквозной ток транзистора большое влияние оказывает на работу германиевых транзисторов большой мощности. Это проявляется в уменьшении максимально допустимого напряжения на коллекторе ввиду опасности теплового пробоя коллекторного перехода. Проследим влияние значения сопротивления в цепи базы, включенного последовательно, на величину максимально допустимого напряжения «коллектор — эмиттер» биполярного транзистора в схеме включения с общим эмиттером.

Наличие положительной обратной связи в транзисторе улучшает условия возникновения лавинного пробоя коллекторного перехода, поэтому предельно допустимое напряжение $U_{KЭ}$ в схеме с ОЭ мень-

ше предельного напряжения $U_{\text{КБ}}$ в схеме включения с ОБ и существенно зависит от величины сопротивления в цепи базы (рис. 56) [1–4, 28].

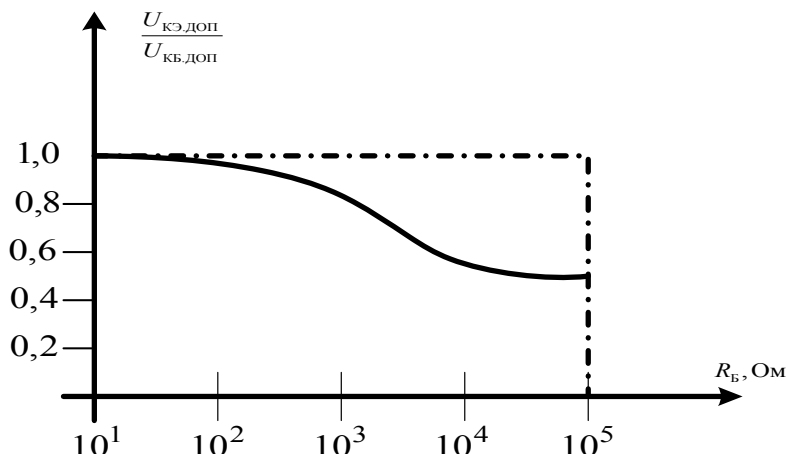


Рис. 56. Зависимость предельно допустимого напряжения от величины сопротивления, включенного в цепь базы, для транзистора типа МП26

В схеме включения биполярного транзистора с ОЭ, как и в схеме включения с ОБ, основными семействами характеристик транзистора являются входные и выходные характеристики.

4.9. Входные характеристики биполярного транзистора в схеме включения с общим эмиттером

Входными характеристиками биполярного транзистора в схеме включения с общим эмиттером называются зависимости тока базы от напряжения «база — эмиттер» при постоянном значении напряжения «коллектор — эмиттер». Входные характеристики формально записываются функциональным уравнением $I_{\text{Б}} = f(U_{\text{БЭ}})|_{U_{\text{КЭ}} = \text{const}}$. Для

снятия характеристик биполярного транзистора в схеме включения с общим эмиттером используется схема в соответствии с рис. 55.

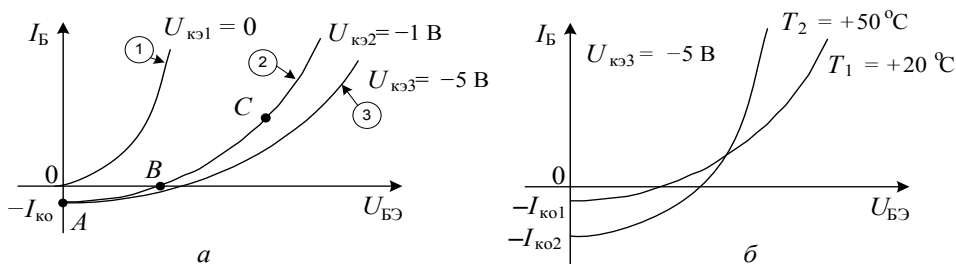


Рис. 57. Семейство входных характеристик

Первая входная характеристика (зависимость 1 на рис. 57, а) представлена для случая, когда напряжение «коллектор — эмиттер» равно нулю $U_{кэ} = 0$ (короткое замыкание коллектора с эмиттером рис. 58). В этом случае открывается не только эмиттерный, но и коллекторный переходы, транзистор работает в режиме насыщения и ток базы равен сумме общего тока эмиттера и общего тока коллектора и возрастает более резко при увеличении напряжения $U_{бэ}$:

$$I_B = I_E + I_K \approx I_{E0} \exp\left\{\frac{U_{БЭ}}{\varphi_T}\right\} + I_{K0} \exp\left\{\frac{U_{БЭ}}{\varphi_T}\right\}. \quad (90)$$

Входная характеристика транзистора при $U_{кэ1} = 0$ начинается из начала координат, при увеличении по модулю напряжения «база — эмиттер» ток базы изменяется по экспоненциальному закону и напоминает прямую ветвь вольтамперной характеристики двух параллельно включенных электронно-дырочных переходов [7].

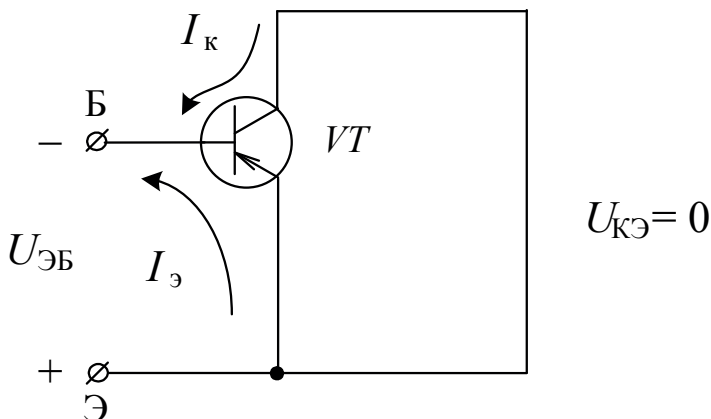


Рис. 58. Диаграмма токов в транзисторе при $U_{кэ} = 0$

При подаче на коллектор отрицательного напряжения, превышающего напряжение $U_{БЭ}$, коллекторный переход закрывается и ток I_K изменяет свое направление (рис. 55). В этом случае транзистор работает в нормальном усилительном режиме, ток коллектора определяется выражением:

$$I_K = \alpha I_{\mathcal{E}} + I_{K0}, \quad (91)$$

а ток базы —

$$I_B = (1 - \alpha) I_{\mathcal{E}} - I_{K0} \quad (92)$$

и возрастает с ростом $U_{БЭ}$ значительно медленнее; входная характеристика существенно смещается вправо (вторая зависимость рис. 57, а, при $U_{KЭ2} = -1$ В). Здесь при напряжении «база — эмиттер» равного нулю значение тока базы отрицательное и определяется величиной неуправляемого тока коллекторного перехода (92), так как первое слагаемое выражения (92) равно нулю (точка А на зависимости рис. 57, а). При подаче напряжения «база — эмиттер» не равным нулю эмиттер начинает инжектировать дырки в базу и появляется положительная составляющая тока базы, которая называется током рекомбинационных потерь базы. При некотором напряжении «база — эмиттер» ток рекомбинационных потерь базы компенсирует неуправляемый ток коллекторного перехода и суммарный ток базы равен нулю (точка В на входной характеристике рис. 57, а). На участке ВС рис. 57, а, ток рекомбинационных потерь базы превышает неуправляемый ток коллекторного перехода и общий ток базы быстро нарастает. Дальнейшее увеличение напряжения «коллектор — эмиттер» (зависимость 3 на рис. 57, а, при $U_{KЭ3} = -5$ В) приводит к незначительному смещению входной характеристики вправо, ибо с ростом напряжения $U_{KЭ}$ вследствие эффекта модуляции толщины базы происходит увеличение коэффициента α и уменьшение тока базы.

Входные характеристики транзистора, снятые при различных температурах, пересекаются в области малых положительных токов базы (рис. 57, б). Пересечение характеристик объясняется тем, что ток базы имеет положительную и отрицательную компоненты, каждая из которых увеличивается при увеличении температуры.

При малых значениях напряжения «база — эмиттер» входная характеристика смещается вниз вследствие роста тока I_{K0} при увеличении температуры, который возрастает экспоненциально. При этом точка пересечения входной характеристики транзистора оси напряжений «база — эмиттер» происходит правее характеристики, снятой при

меньшей температуре (рис. 57, б). Это происходит по двум причинам: во-первых, с ростом температуры экспоненциально увеличивается неуправляемый ток коллекторного перехода, и для его компенсации требуется большее значение тока рекомбинационных потерь базы; во-вторых, увеличение температуры окружающей среды ведет к возрастанию коэффициента передачи по току транзистора в схеме включения с общей базой, а это приводит к уменьшению тока рекомбинационных потерь базы. В области больших токов базы входная характеристика смещается влево, так как рост температуры приводит к уменьшению высоты потенциального барьера, росту тока $I_{\text{э}}$, а следовательно, и тока $I_{\text{б}}$.

4.10. Выходные характеристики биполярного транзистора в схеме включения с общим эмиттером

Выходными характеристиками биполярного транзистора в схеме включения с общим эмиттером называются зависимости тока коллектора от напряжения «коллектор — эмиттер» при постоянном значении тока базы. Формально выходные характеристики биполярного транзистора в схеме включения с общим эмиттером записываются в виде функционального уравнения $I_{\text{к}} = f(U_{\text{кэ}}) \Big|_{I_{\text{б}} = \text{const}}$. Схема включения транзистора для снятия выходных характеристик соответствует рис. 55.

Выходные характеристики транзистора в схеме включения с ОЭ $I_{\text{к}} = f(U_{\text{кэ}}) \Big|_{I_{\text{б}} = \text{const}}$ (рис. 59) отличаются от выходных характеристик в схеме включения с ОБ $I_{\text{к}} = f(U_{\text{кб}}) \Big|_{I_{\text{э}} = \text{const}}$, во-первых, тем, что первые оказываются сдвинутыми по оси напряжений вправо на величину напряжения $\approx U_{\text{бэ}}$, так как в схеме включения биполярного транзистора с ОЭ напряжение на коллекторном переходе становится равным нулю при напряжении $|U_{\text{кэ}}| \cong |U_{\text{бэ}}|$.

Во-вторых, выходные характеристики в схеме включения с ОЭ на рабочем участке идут более круто, так как при снятии этих характеристик поддерживается постоянным ток базы $I_{\text{б}} = (1 - \alpha)I_{\text{э}} - I_{\text{к0}}$. Ток $I_{\text{к0}}$ не изменяется при увеличении напряжения на коллекторе, а коэффициент α при этом увеличивается. Следовательно, для под-

держания тока I_B постоянным значением необходимо несколько увеличить ток $I_{\mathcal{E}}$.

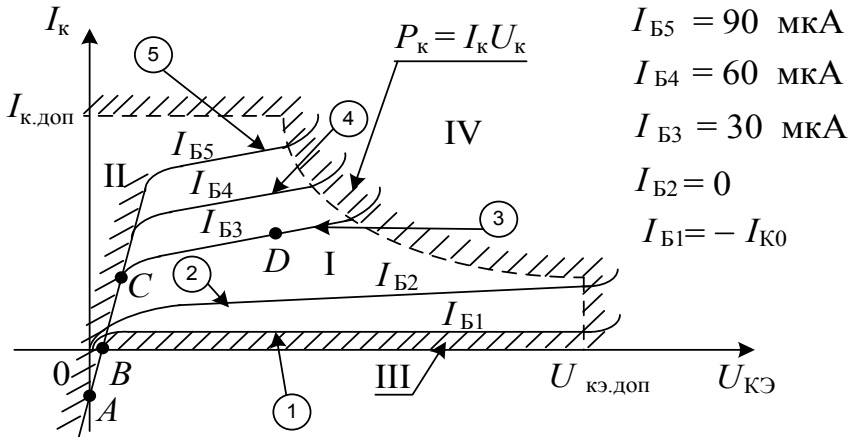


Рис. 59. Семейство выходных характеристик в схеме включения с ОЭ

Таким образом, выходная характеристика в схеме с ОБ снимается при постоянном токе $I_{\mathcal{E}}$, а в схеме с ОЭ — при постепенно возрастающем токе $I_{\mathcal{E}}$.

Как и в схеме с ОБ, на семействе выходных характеристик транзистора в схеме с ОЭ различают четыре области, соответствующие различным режимам работы транзистора:

I — режим активного усиления (эмиттерный переход прямосмещенный, а коллекторный переход обратносмещенный);

II — режим насыщения (оба перехода открыты);

III — режим отсечки (оба перехода закрыты);

IV — нерабочая область (ограничивается предельно-допустимыми параметрами: максимально-допустимым током коллектора; максимально-допустимым напряжением «коллектор — эмиттер»; максимальной мощностью рассеяния на коллекторном переходе).

Первая выходная характеристика снимается при отрицательном токе базы (имеет место обрыв цепи эмиттера), и ток базы равен неуправляемому току коллекторного перехода (зависимость 1, рис. 59). В этом случае выходная характеристика аналогична обратной ветви вольтамперной характеристики электронно-дырочного перехода [7], и величина

тока коллектора соответствует зависимости $I_K = I_{K0} \left[1 - \exp \left\{ -\frac{|U_{КЭ}|}{\Phi_T} \right\} \right]$,

и при значении $|U_{кэ}| \cong (0,1 - 0,2)$ В второе слагаемое в скобках имеет очень малое значение, ток коллектора равен $I_{к0}$ и слабо изменяется в большом диапазоне изменения напряжения на коллекторе.

Вторая выходная характеристика транзистора (зависимость 2, рис. 59) соответствует току базы $I_{Б2} = 0$ (обрыв цепи базы). В этом случае в цепи «коллектор — эмиттер» протекает сквозной ток транзистора $I_{к0}^*$, превышающий в $(\beta + 1)$ раз неуправляемый ток коллекторного перехода. Данная характеристика также начинается из начала координат и увеличивается по мере возрастания обратного тока перехода «коллектор — база». При изменении напряжения на коллекторе изменяется коэффициент передачи по току транзистора в схеме включения с общим эмиттером из-за эффекта модуляции толщины базы. Увеличение по модулю напряжения на коллекторе ведет к возрастанию коэффициента передачи по току и сквозного тока транзистора.

Увеличение тока базы I_B приводит к росту тока коллектора в соответствии с выражением $I_K = \beta I_B + I_{к0}^*$, и выходная характеристика идет выше и смещена вправо относительно начала координат.

Зависимость 3, рис. 59, снята при $I_{Б3} = 30$ мкА. Если ток базы $I_B > 0$, а $U_{кэ} = 0$, то это равносильно короткому замыканию коллектора с эмиттером (рис. 58). При этом открыт не только эмиттерный переход, но и коллекторный переход тоже работает при прямом смещении. Ток коллектора имеет две составляющие: ток коллектора экстракции $I_{к.экстр} \cong \alpha I_э$ и ток

коллектора инжекции $I_{к.инж}$. Причем, поскольку площадь коллекторного перехода всегда больше площади эмиттерного перехода ($S_K > S_э$), то $I_{к.инж} > I_{к.экстр}$, а общий ток коллектора $I_K = (I_{к.экстр} - I_{к.инж}) < 0$. На зависимости 3, рис. 50, это соответствует точке А. При подаче обратного напряжения на коллекторный переход $I_{к.инж}$ начинает уменьшаться, в точке В зависимости 3, рис. 59, наблюдается равенство $I_{к.экстр} = I_{к.инж}$, и общий ток коллектора становится равным нулю. При дальнейшем увеличении напряжения $|U_{кэ}|$ ток инжекции продолжает уменьшаться и в точке С зависимости 3, рис. 59, напряжения $|U_{кэ}| \cong |U_{Бэ}|$ равны, в этом случае на переходе «коллектор — база» напряжение равно нулю, $I_{к.инж} = 0$, а общий ток коллектора определяется соотношением $I_K = \beta I_{Б3}$. Участок CD относится к режиму активного усиления, коллекторный переход получает обратное смещение и работает в режиме экстракции, а эмиттерный — в режиме инжекции. На участке CD ток коллектора равен $I_K = \beta I_B + (\beta + 1)I_{к0}$

и зависит от изменения напряжения $U_{кэ}$ в виду наличия в транзисторе эффекта модуляции толщины базы, который с ростом $|U_{кэ}|$, проявляется в увеличении коэффициента передачи по току β .

С дальнейшим ростом тока базы (зависимости 4, 5, при $I_{Б4}$, $I_{Б5}$, рис. 59) выходные характеристики идут выше и правее от начала координат. В этом случае возрастает величина напряжения $|U_{Бэ}|$, и при большем значении $|U_{кэ}|$ будет выполняться условие нулевого напряжения на переходе «коллектор — база», которое соответствует началу режима активного усиления транзистора.

Отличительной особенностью транзистора в схеме включения с ОЭ является то, что он может управляться не только положительным, но и отрицательным входным током в диапазоне $I_{Б} = 0 - I_{К0}$. При $I_{Б} = -I_{К0}$, что соответствует случаю $I_{э} = 0$, в цепи коллектора протекает неуправляемый ток коллекторного перехода $I_{К0}$.

4.11. Влияние температуры на выходные характеристики БТ в схеме включения с общим эмиттером

На рис. 60 приведены выходные характеристики транзистора в схеме включения с общим эмиттером для двух токов базы ($I_{Б1} = -I_{К0}$; $I_{Б2} = 0$), снятые при двух различных температурах окружающей среды, а на рис. 61 представлены выходные характеристики при токах базы больше нуля, снятые для двух значений температуры окружающей среды.

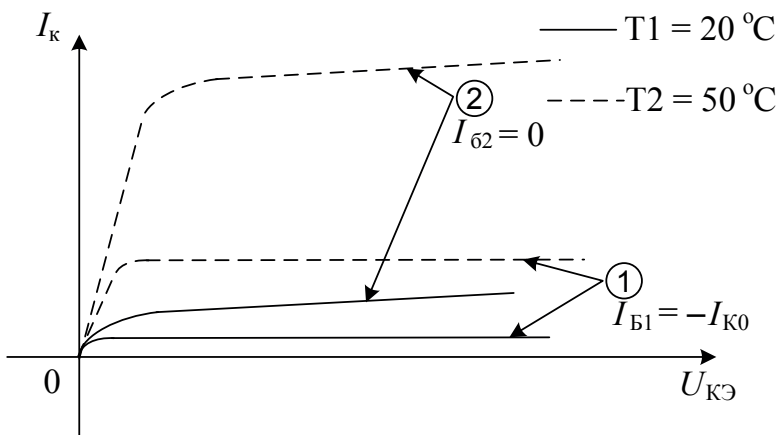
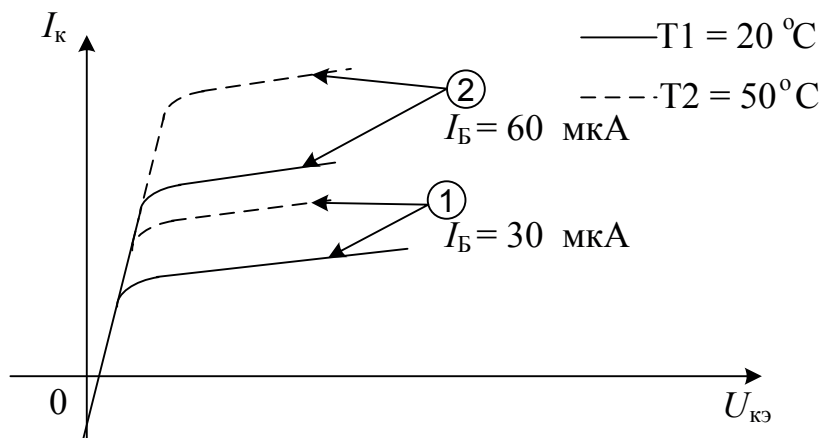


Рис. 60. Влияние температуры на выходные характеристики при $I_{Б1}$ и $I_{Б2}$

Рис. 61. Влияние температуры на выходные характеристики при I_{B3} и I_{B4}

При токе базы $I_{B1} = -I_{K0}$ (зависимость 1, рис. 60) с ростом температуры неуправляемый ток коллекторного перехода возрастает по экспоненциальному закону (то есть приблизительно удваивается при увеличении температуры окружающей среды на каждые 10°C).

При токе базы $I_{B2} = 0$ ток коллектора определяется сквозным током транзистора $I_K = I_{K0}^* = (\beta + 1)I_{K0}$. Влияние температуры проявляется в увеличении I_{K0} и β .

При токах базы $I_{B2} > 0$ (зависимость 1, 2, рис. 61) ток коллектора определяется уравнением $I_K = \beta I_B + (\beta + 1)I_{K0}$. Выходные характеристики в схеме включения с ОЭ снимаются при фиксированных значениях тока базы $I_B = (1 - \alpha)I_{\text{Э}} - I_{K0}$. С увеличением температуры экспоненциально увеличивается ток I_{K0} , а также несколько увеличивается коэффициент α , а следовательно, и β . Последнее обстоятельство приводит к тому, что с увеличением температуры увеличивается наклон выходных характеристик.

Для поддержания тока базы постоянным приходится существенно увеличивать ток $I_{\text{Э}}$, естественно, что при этом будет возрастать и ток коллектора $I_K = \alpha I_{\text{Э}} + I_{K0}$.

Таким образом, выходные характеристики в схеме включения с общим эмиттером не термостабильны. Следует отметить, что транзисторы, выполненные на основе кремния, имеют меньшую зависимость характеристик от температуры, так как значение неуправляемого тока коллекторного перехода I_{K0} у кремниевых транзисторов во много раз меньше, чем у германиевых.

4.12. Влияние режима работы биполярного транзистора и температуры окружающей среды на коэффициент передачи по току в схеме включения с ОБ

4.12.1. Зависимость коэффициента передачи по току от напряжения на коллекторе

В общем случае влияние режима работы биполярного транзистора и температуры окружающей среды описываются функционалом: $\beta = F[U_{кэ}, I_K, T^{\circ}\text{C}]$. Чтобы выяснить влияние напряжения на коллекторе на значение коэффициента передачи по току, необходимо принять значение I_K и $T^{\circ}\text{C}$ постоянными величинами. Тогда функционал преобразуется к виду: $\beta = F[U_{кэ}]|_{I_K, T^{\circ}\text{C} = \text{const}}$. График зависимости β от напряжения на коллекторе представлен на рис. 62.

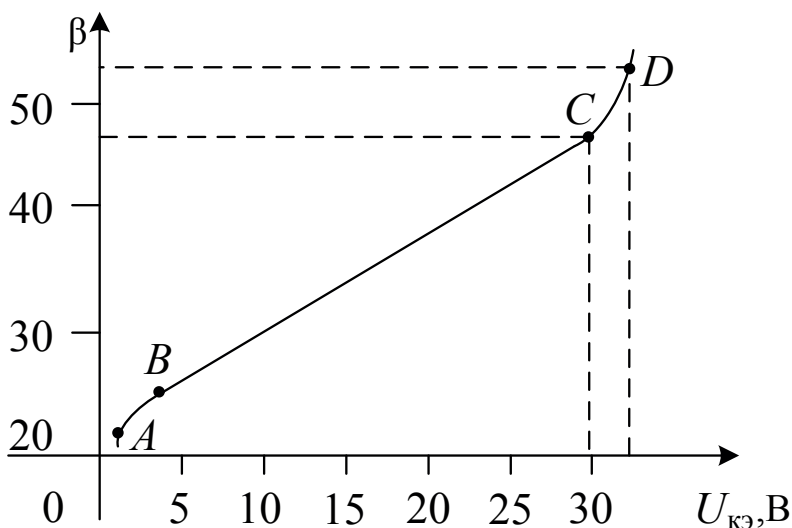


Рис. 62. Зависимость коэффициента передачи по току от напряжения на коллекторе

Для пояснения графика рис. 62 необходимо отметить, что коэффициент β зависит от коэффициента передачи по току α в схеме включения с общей базой. А величина α в основном определяется коэффициентом переноса χ , характеризующим область базы:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}; \quad (93)$$

$$\alpha = \gamma \cdot \chi \cdot \alpha^* \cong \chi = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{w}{L_p} \right)^2, \quad (94)$$

где w — толщина базы, L_p — длина диффузии дырок в базе (для транзистора p - n - p типа). В свою очередь толщина базы изменяется от величины напряжения на коллекторе вследствие эффекта модуляции толщины базы. В этом случае толщина базы записывается в виде:

$$w(U_{кэ}) \cong w_0 - I_{к0} \sqrt{\frac{|U_{кб}|}{\Phi_{кк}}}, \quad (95)$$

где w_0 — равновесная толщина базы при нулевом напряжении на коллекторе; $I_{к0}$ — равновесная ширина перехода «коллектор — база»; $|U_{кб}|$ — модуль напряжения на переходе «коллектор — база».

Из выражения (95) видно, что ширина коллекторного перехода от напряжения $U_{кб}$ изменяется нелинейно, поэтому при малых изменениях модуля напряжения $|U_{кб}|$ будет больше изменение толщины базы и зависимость рис. 62 этот факт учитывает участком AB . При больших напряжениях на коллекторе зависимость β на рис. 62 имеет линейный характер (участок BC). Например, для транзистора p - n - p типа имеем при $U_{кб1} = -2$ В $\alpha_1 = 0,96$, а при $U_{кб2} = -30$ В $\alpha_1 = 0,98$. Тогда, $\beta_1 \cong 24$, а $\beta_2 = 48$, то есть малым изменениям коэффициента α на участке BC соответствуют достаточно большие изменения коэффициента β . На участке CD зависимости на рис. 62 наблюдается лавинное размножение носителей заряда в коллекторном переходе, но этот режим входит в нерабочую область на выходных характеристиках биполярного транзистора и не используется в практических схемах.

4.12.2. Зависимость коэффициента передачи по току от тока коллектора

Функционал коэффициента передачи по току преобразуется к виду:

$$\beta = f[I_k]_{U_{кэ}, T, \text{ } ^\circ\text{C}=\text{const}}. \quad (96)$$

График зависимости β от тока коллектора представлен на рис. 63.

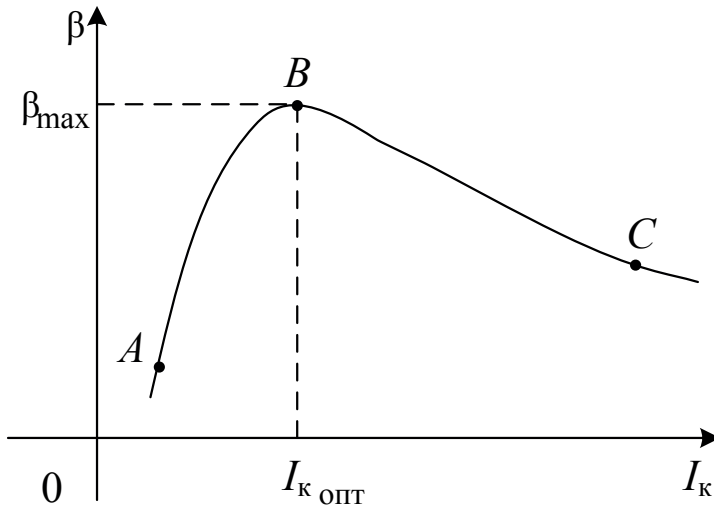


Рис. 63. Зависимость коэффициента передачи по току от тока коллектора

При рассмотрении зависимости рис. 63 необходимо учитывать, что $I_K = \alpha I_{\text{э}} + I_{K0}$ и выражение (94) записать в виде:

$$\alpha = \gamma \cdot \chi \cdot \alpha^* \cong \left[1 - \frac{\Phi_{\text{э}}}{\rho_{\text{Б}}} \frac{w}{L_p} \right] \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{w}{L_p} \right)^2 \right]. \quad (97)$$

Из теории работы биполярного транзистора следует, что ток эмиттера зависит от значения напряжения на переходе «эмиттер — база» $I_{\text{э}} = f(U_{\text{Бэ}})$ и определяется током диффузии дырок через базу

$$I_{\text{э}} = I_{\text{эD}} = -eSD_p \frac{dp}{dx}, \quad (98)$$

где e — заряд электрона; S — площадь перехода эмиттер — база; D_p — коэффициент диффузии дырок в базе; $\frac{dp}{dx}$ — градиент концентрации

дырок в базе. Коэффициент диффузии связан с длиной диффузии соотношением:

$$L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau}, \quad (99)$$

где τ — время жизни носителей заряда.

При увеличении напряжения «эмиттер — база» растет избыточная концентрация дырок на границе перехода «эмиттер — база», возраста-

ет градиент концентрации и увеличивается скорость движения носителей заряда в базе, что уменьшает рекомбинационные потери в базе и ведет к росту коэффициента передачи по току. В этом случае коэффициент диффузии дырок в базе определяется соотношением:

$$D_p = D_{p0} \left(1 + \frac{p_n}{n_n + p_n} \right), \quad (100)$$

где D_{p0} — коэффициент диффузии при малом уровне инжекции дырок из эмиттера в базу. Поэтому на участке AB (рис. 63) изменяется уровень инжекции дырок из эмиттера в базу, растет коэффициент диффузии (100) и длина диффузии L_p (99), что ведет к росту коэффициента передачи по току, и в точке B он принимает максимальное значение β_{\max} . Существует оптимальное значение тока коллектора $I_{\text{к.опт}}$, при котором достигается β_{\max} . Для маломощных биполярных транзисторов $I_{\text{к.опт}} \cong (1-3) \text{ мА}$, а для мощных транзисторов — $I_{\text{к.опт}} \cong (30-80) \text{ мА}$.

При увеличении тока коллектора более $I_{\text{к.опт}}$ начинает сказываться уменьшение эффективности эмиттера γ (97) из-за уменьшения удельного электрического сопротивления базы ρ_b , которое определяется:

$$\rho_b = \frac{1}{\sigma_b} = \frac{1}{e\mu_n n_n + e\mu_p p_n} \quad (101)$$

При малых значениях тока эмиттера (а равно и тока коллектора) дырочная составляющая электропроводности базы σ_{bp} имеет малое значение и ρ_b достаточно велико. При больших токах эмиттера, когда $p_n \gg n_n$, увеличивается σ_{bp} и ρ_b уменьшается, а это приводит к уменьшению эффективности эмиттера γ , коэффициента α и в том числе коэффициента передачи по току биполярного транзистора в схеме включения с общим эмиттером β (участок BC , рис. 63). Изменение β на участке BC (рис. 63) происходит достаточно плавно.

4.12.3. Зависимость коэффициента передачи по току от температуры окружающей среды

Для схемы включения биполярного транзистора с общим эмиттером: $\beta = f[T^\circ\text{C}] \mid_{U_{кэ}, I_{к}=\text{const}}$. В этом случае β оценивается величиной α из соотношения (94) с учетом зависимости длины диффузии дырок L_p (99). В выражении (99) с ростом $T^\circ\text{C}$ возрастает несколько время жизни носителей заряда и график зависимости β от температуры окружающей среды имеет линейный характер (рис. 64).

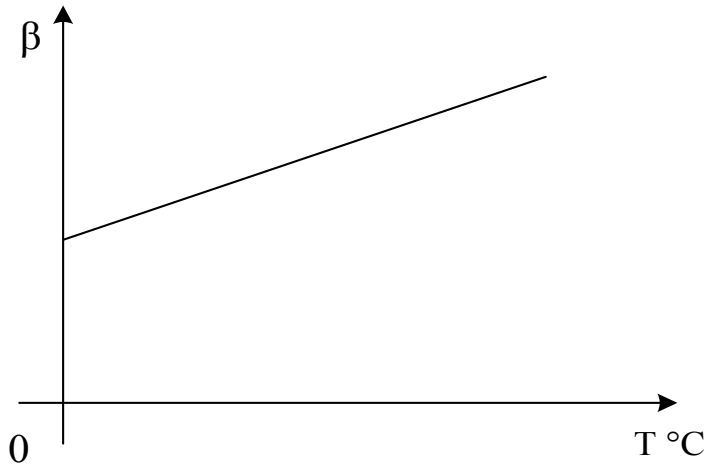


Рис. 64. Зависимость коэффициента передачи по току от температуры окружающей среды

4.13. Система H -параметров биполярного транзистора в схеме включения с общим эмиттером

Система уравнений для H -параметров биполярного транзистора представляется в виде (64). А матрица H -параметров:

$$H = \begin{vmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{vmatrix} \quad (102)$$

Для биполярного транзистора в схеме включения с общим эмиттером входным током является ток базы ($I_1 = I_{\text{БХ}} = I_{\text{Б}}$), выходным током — ток коллектора ($I_2 = I_{\text{ВЫХ}} = I_{\text{К}}$), входным напряжением — напряжение «база — эмиттер» ($U_1 = U_{\text{БХ}} = U_{\text{БЭ}}$), выходным напряжением — напряжение «коллектор — эмиттер» ($U_2 = U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{КЭ}}$). При этом H -параметры записываются в виде (с учетом связи с H -параметрами биполярного транзистора в схеме включения с общей базой):

1. Входное сопротивление — $H_{11Э}$,

$$H_{11Э} = \left. \frac{dU_{\text{БЭ}}}{dI_{\text{Б}}} \right|_{U_{\text{КЭ}} = \text{const}} = \frac{H_{11Б}}{(1 - \alpha)} = (\beta + 1)H_{11Б}, \quad (103)$$

то есть $H_{11Э} \gg H_{11Б}$ и составляет значения сотни Ом, единицы кОм;

2. Коэффициент обратной связи по напряжению — $H_{12Э}$,

$$H_{12Э} = \left. \frac{dU_{БЭ}}{dU_{КЭ}} \right|_{I_{Б} = \text{const}}, \quad (104)$$

$$H_{12Э} \cong H_{22Б} = (10^{-3} - 10^{-4});$$

3. Коэффициент передачи по току — $H_{21Э}$,

$$H_{21Э} = \left. \frac{dI_{К}}{dI_{Б}} \right|_{U_{К} = \text{const}} = \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}, \quad (105)$$

$$H_{21Э} = (20 - 200);$$

4. Выходная проводимость — $H_{22Э}$,

$$H_{22Э} = \left. \frac{dI_{К}}{dU_{КЭ}} \right|_{I_{Б} = \text{const}} = \frac{H_{22Б}}{1 - \alpha}, \quad (106)$$

$$H_{22Э} = (3 \cdot 10^{-4} - 10^{-5}) \text{ Сим.}$$

4.14. Лабораторное задание № 5 «Исследование характеристик и параметров биполярного транзистора в схеме включения с общим эмиттером»

Цель работы

Исследовать характеристики и параметры биполярного транзистора в схеме включения с общим эмиттером и изучить влияние температуры окружающей среды на ход характеристик и изменение параметров.

1. Записать паспортные параметры исследуемого транзистора и зарисовать схему расположения его выводов.

2. Рассчитать и построить кривую допустимой мощности, рассеиваемой транзистором.

3. Собрать схему для исследования транзистора в схеме включения с ОЭ (рис. 65).

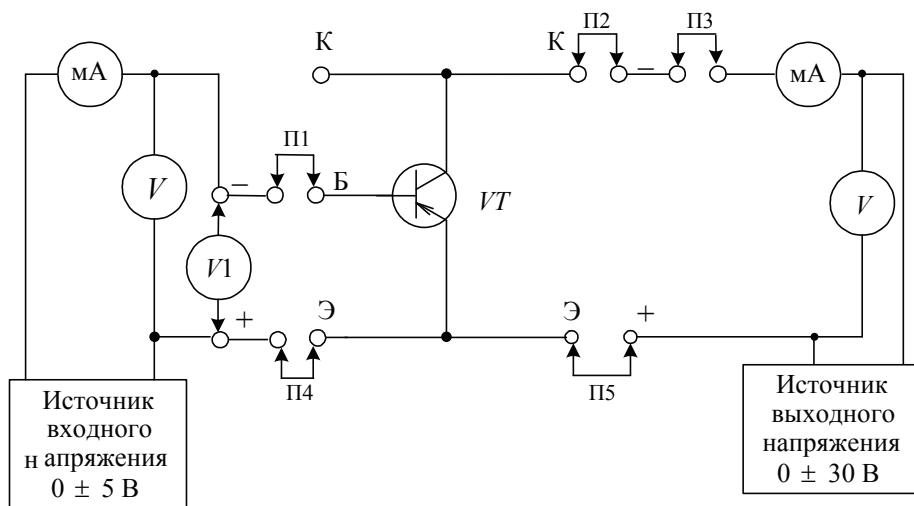


Рис. 65. Схема лабораторной установки

Прибор (мА) источник входного напряжения измеряет ток базы (I_B), а вольтметр (V) служит для измерения входного напряжения транзистора ($U_{БЭ}$). В выходной цепи прибор (мА) измеряет ток коллектора (I_K), а вольтметр V — напряжение между коллектором и эмиттером ($U_{КЭ}$). Для повышения точности измерения входного напряжения $U_{КЭ}$ во входную цепь целесообразно включить цифровой вольтметр $M-890D$ или $M-833$ ($V1$).

4. Снять семейство входных характеристик $I_B = f(U_{БЭ})|_{U_{КЭ} = \text{const}}$ при комнатной температуре для двух значений напряжения на коллекторе: $U_{КЭ} = 0, -5$ В.

При снятии входных характеристик задаваться током базы от 0 до 100 мкА и при этом отмечать значения напряжения на базе.

При отрицательных значениях напряжений на коллекторе найти напряжение на базе, при котором ток станет равным нулю.

5. Снять семейство выходных характеристик $I_K = f(U_{КЭ})|_{I_B = \text{const}}$

для четырех значений тока базы: $I_B = 0, 30, 60, 90$ мкА при комнатной температуре. При снятии выходных характеристик задаваться напряжением на коллекторе и не превышать максимальных значений тока и напряжений, а также мощности, рассеиваемой на коллекторе транзистора. При снятии характеристики для $I_B = 0$, цепь базы следует разорвать, т. е. убрать перемычку П1.

6. Снять проходную характеристику транзистора $I_K = f(U_{БЭ})|_{U_{КЭ} = \text{const}}$

и входную характеристику $I_B = f(U_{БЭ})|_{U_{КЭ} = \text{const}}$ при напряжении на коллекторе $U_{КЭ} = -5 \text{ В}$. При снятии характеристик задаваться током базы от 0 до 100 мкА и отмечать при этом величину тока коллектора и напряжения на базе.

Результаты эксперимента свести в табл. 11.

Таблица 11

I_B , мкА	0	2	10	20	30	40	60	80	100
I_K , мА									
$U_{БЭ}$, В									
β									
S мА/В									

7. Исследуемый транзистор поместить в печь, предварительно разогретую до температуры 70°C , и через 5 минут повторить пункт 5 лабораторного задания.

Обработка результатов эксперимента

1. По построенным характеристикам транзистора, снятым при комнатной температуре, определить $H_{Э}$ -параметры. Параметр $H_{12Э}$ принять равным 10^{-4} .

2. По вычисленным $H_{Э}$ -параметрам подсчитать параметры Т-образной эквивалентной схемы по формулам:

$$r_3 = \frac{H_{12Э}}{H_{22Э}}; r_6 = H_{21Э} - (1 + H_{21Э}) \frac{H_{12Э}}{H_{22Э}}; r_K = \frac{1 + H_{21Э}}{H_{22Э}};$$

$$\alpha = \frac{H_{21Э}}{1 + H_{21Э}}; \mu = \frac{H_{21Э}}{1 + H_{21Э}} \cdot H_{12Э}; S = \frac{H_{21Э}}{H_{11Э}}.$$

3. Используя данные табл. 11, определить:

а) значение крутизны характеристики $S = \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{БЭ}}|_{U_{КЭ}};$

б) величину коэффициента усиления по току $\beta = \Delta I_K / \Delta I_B|_{U_{КЭ}}$ для всех значений тока базы. Вычисленные значения β и S внести в табл. 11;

в) построить графики зависимости $\beta = f(I_k)$ и $S = f(U_{бэ})$.

Таблица 12

Параметры	$H_{11э}$	$H_{12э}$	$H_{21э}$	$H_{22э}$	$r_{э}$	$r_{б}$	$r_{к}$	α	μ	S
Размерность										
Паспортные значения										
Расчетные значения										

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Формулировку цели исследования;
2. Схему для исследования транзистора;
3. Таблицы результатов измерений;
4. График семейства входных характеристик при комнатной температуре с указанием области определения $H_{э}$ -параметров;
5. График семейства выходных характеристик при комнатной и повышенной температурах. На этом графике построить кривую допустимой мощности и указать область определения $H_{э}$ -параметров;
6. График проходной характеристики;
7. График зависимости $\beta = f(I_k)$;
8. График зависимости $S = f(U_{бэ})$;
9. Таблицу со справочными и расчетными параметрами;
10. Анализ полученных результатов.

4.15. Контрольные вопросы

1. Расскажите об устройстве биполярного транзистора. Каковы его конструктивные особенности?
2. Из каких компонентов состоит ток через эмиттерный переход?
3. Напишите выражение тока коллектора в режиме усиления и поясните его составляющие.
4. Напишите выражение тока базы в режиме усиления и поясните его составляющие.
5. Что такое «эффективность эмиттера γ » и как она зависит от конструктивных параметров транзистора?

6. Что показывает коэффициент переноса χ ? Как он зависит от конструктивных параметров транзистора?

7. Напишите выражение для коэффициента передачи эмиттерного тока в коллектор α через конструктивные параметры транзистора.

8. Что такое «эффект модуляции ширины базы» и к каким следствиям приводит это явление?

9. Нарисуйте зависимость α от коллекторного напряжения и объясните ее ход.

10. Нарисуйте и объясните зависимость α от тока эмиттера.

11. Нарисуйте семейство входных характеристик в схеме включения с ОБ. Поясните влияние $U_{КБ}$ и температуры на ход характеристик.

12. Нарисуйте семейство выходных характеристик в схеме включения с ОБ и поясните их ход.

13. Что такое «ток $I_{К0}$ », каковы причины его возникновения и как он изменяется с изменением температуры?

14. На семействе выходных характеристик транзистора укажите режимы работы и дайте их определение.

15. В каких случаях транзистор можно заменить линейным четырехполусником?

16. Напишите выражение для H_6 -параметров, поясните их физический смысл.

17. Какие H_6 -параметры можно определить по входным и какие по выходным характеристикам транзистора?

18. Как связаны между собой выходной и входной токи транзистора в схеме включения с ОЭ?

19. Что такое «сквозной ток транзистора»? Поясните механизм его возникновения.

20. Нарисуйте семейство выходных характеристик транзистора в схеме включения с ОЭ. Укажите режим работы транзистора. Поясните влияние $U_{кэ}$ и температуры на ход характеристик.

21. Нарисуйте семейство входных характеристик в схеме включения с ОЭ. Объясните влияние $U_{кэ}$ и температуры на ход характеристик.

22. Напишите выражение для H_9 -параметров, поясните их физический смысл.

23. Поясните графический метод определения H_9 -параметров.

24. Как связаны между собой H_6 - и H_9 -параметры? Назовите порядки величин H_9 -параметров в схемах включения с ОБ и ОЭ.

25. Каковы основные преимущества и недостатки схемы включения транзистора с ОЭ по сравнению со схемой включения с ОБ?

26. Какие транзисторы называются дрейфовыми? Каковы их конструктивные особенности?

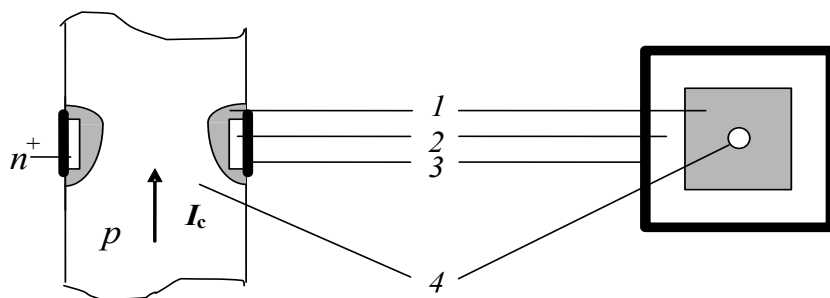
5. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ С УПРАВЛЯЮЩИМ p - n -ПЕРЕХОДОМ

5.1. Устройство и принцип действия полевого транзистора с управляющим p - n -переходом

Полевым транзистором называется электропреобразовательный прибор, пригодный для усиления мощности, ток в котором переносится дрейфовым движением основных носителей заряда, а величина выходного тока регулируется электрическим полем, возникающим при подаче напряжения между затвором и истоком.

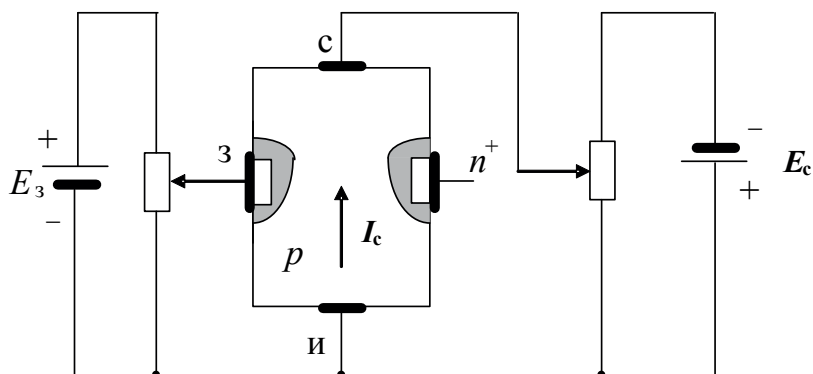
Полевой транзистор с управляющим p - n -переходом — это полевой транзистор, управление потоком основных носителей в котором происходит с помощью электронно-дырочного перехода, смещенного в обратном направлении.

Для изготовления полевого транзистора с управляющим p - n -переходом берется тонкая, слаболегированная пластинка кремниевого полупроводника (с высоким удельным сопротивлением) n - или p -типа. На этой пластинке создают кольцевой электронно-дырочный переход. Тонкий слой полупроводника, ограниченный кольцеобразным p - n -переходом, в котором регулируется поток носителей заряда, называется **каналом**. Наплавка (затвор) сильно легируется примесями. Полевой транзистор содержит один p - n -переход и три вывода: исток, сток, затвор. Устройство полевого транзистора показано на рис. 66.

Рис. 66. Структура полевого транзистора с управляющим p - n -переходом

На рисунке используются следующие обозначения: 1 — p - n -переход, 2 — затвор n^+ -типа, 3 — наплавка (вывод затвора), 4 — канал p -типа.

Принцип действия полевых транзисторов с каналом n - или p -типов идентичен. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать работу полевых кремниевых транзисторов с управляющим p - n -переходом на примере транзистора с каналом p -типа. Электрод полевого транзистора, предназначенный для регулирования поперечного сечения канала, называется **затвором**. На него относительно истока подается положительное напряжение. В этом случае p - n -переход «затвор — исток» находится под обратным смещением. Электрод, через который входят в канал основные носители заряда (в нашем примере это дырки), называется **истоком**, а электрод, через который выходят носители заряда, называется **стоком**. На сток относительно истока должно подаваться отрицательное напряжение. Схема включения полевого транзистора с управляющим p - n -переходом и каналом p -типа приведена на рис. 67.

Рис. 67. Схема включения полевого транзистора с управляющим p - n -переходом

Управление током транзистора основано на изменении сечения канала путем регулирования ширины p - n -перехода при подаче входного напряжения (напряжения затвора). На затвор относительно истока подается обратное напряжение, поэтому область p - n -перехода будет расширяться в основном в область полупроводника p -типа, так как эта область полупроводника менее легирована, чем область полупроводника n -типа. При подаче напряжения на сток в его цепи потечет ток I_C , создаваемый дырками, движущимися под действием электрического поля. Количество основных носителей зарядов (дырок), участвующих в образовании тока через канал, определяется электрическим полем, воздействующим на p - n -переход. Как уже отмечалось, p - n -переход включается в обратном направлении. Если на затвор подать положительное напряжение, p - n -переход расширяется в соответствии с выражением

$$l_{\text{ОБР}} = l_0 \cdot \sqrt{\frac{\phi_K + U_{\text{ЗИ}}}{\phi_K}}, \quad (107)$$

где $l_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \phi_K}{e} \cdot \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}$ — ширина p - n -перехода в равновес-

ном состоянии, ϕ_K — контактная разность потенциалов, $U_{\text{ЗИ}}$ — напряжение на затворе относительно истока, ε — относительная диэлектрическая постоянная, $\varepsilon_0 = 9 \cdot 10^{-14}$ Ф/см — абсолютная диэлектрическая постоянная, $e = 1,6 \cdot 10^{19}$ Кл — заряд электрона, N_A — концентрация акцепторной примеси, N_D — концентрация донорной примеси.

Исходная пластинка кремниевого полупроводника p -типа слабо легирована примесями, поэтому $N_D \gg N_A$ и с увеличением $U_{\text{ЗИ}}$ расширение p - n -перехода (107) произойдет в область полупроводника p -типа, сечение канала уменьшится, а его сопротивление r_K увеличится. Электрическое сопротивление канала r_K зависит от его толщины, ширины и длины:

$$r_K = \frac{l_K}{\sigma \cdot S_K} = \frac{l_K}{e \cdot \mu_p \cdot \rho_p \cdot h \cdot W}, \quad (108)$$

где l_K — длина канала, h — ширина канала, W — толщина канала, σ — электропроводность полупроводника p -типа, μ_p — подвижность дырок, ρ_p — концентрация дырок (основных носителей заряда) в области полупроводника p -типа, S_K — сечение канала.

В соответствии с соотношениями (107) и (108) при изменении напряжения на затворе меняются ширина p - n -перехода, сечение канала и его электрическое сопротивление, в результате чего будет изменяться величина протекающего тока стока. С увеличением r_k ток стока I_C уменьшается. Сечение канала S_k изменяется неравномерно. Со стороны истока имеется более широкий канал, а со стороны стока сечение канала уменьшается. Это происходит потому, что сечение канала является функцией двух напряжений: $S_k = f(U_{зи}, U_{си})$. Напряжение у стока будет больше, чем у истока, поэтому расширение p - n -перехода в области стока больше, чем в области истока. Это явление нашло свое отражение на рис. 66 и рис. 67. Напряжение $U_{си}$ распределяется вдоль канала, оно больше у стока и меньше у истока. За счет этого сечение канала, расположенного со стороны стока, всегда будет значительно меньше, чем со стороны истока (рис. 66, 67).

Входной ток полевого транзистора равен току затвора $I_{вх} = I_3$, и он обусловлен только переносом неосновных носителей заряда через p - n -переход.

Обозначение полевого транзистора с управляющим p - n -переходом на принципиальных электрических схемах приведено на рис. 68.



Рис. 68. Условные обозначения полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом на схемах электрических принципиальных

5.2. Выходные характеристики полевого транзистора с управляющим p - n -переходом

Под **выходными характеристиками** полевого транзистора с управляющим p - n -переходом понимают зависимости тока стока от напряжения «сток — исток» при постоянном напряжении на затворе:

$$I_C = f(U_{СИ}) \Big|_{U_{ЗИ} = \text{const}} \quad (109)$$

Рассмотрим семейство выходных характеристик полевого транзистора при различных напряжениях на затворе. Эти зависимости представлены на рис. 69.

Характеристика при $U_{ЗИ1} = 0$ начинается из начала координат. На участке OA (рис. 69) при увеличении напряжения $U_{СИ}$ выходной ток I_C растет линейно, подчиняясь закону Ома. Плотность дрейфового тока через канал определяется выражением

$$i_{ДР} = \sigma E = e \cdot \rho_p \cdot V, \quad (110)$$

где $i_{ДР}$ — плотность дрейфового тока, E — напряженность электрического поля, V — дрейфовая скорость движения носителей заряда (дырок) в полупроводнике p -типа.

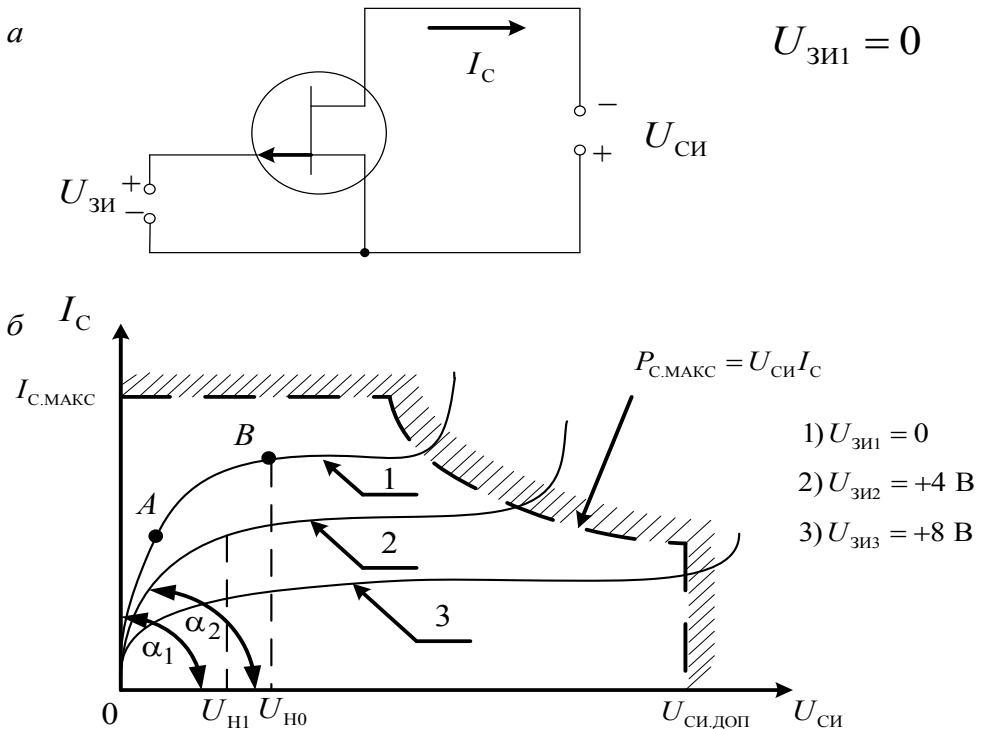


Рис. 69. Выходные характеристики полевого транзистора с управляющим p - n -переходом: *a* — схема включения полевого транзистора с каналом p -типа, *б* — семейство выходных характеристик

При увеличении $U_{\text{СИ}}$ растет дрейфовая скорость носителей заряда, а следовательно, и ток стока. При протекании тока стока появляется падение напряжения в канале, под его действием p - n -переход получает обратное смещение и расширяется в область малолегированного канала. Чем ближе к стоку, тем больше смещение p - n -перехода и тем уже в этом месте канал. На участке AB зависимости 1 (рис. 69) рост тока стока замедляется из-за уменьшения сечения канала S_K и зависимость тока стока I_C от напряжения сток-исток $U_{\text{СИ}}$ не подчиняется закону Ома. В точке A напряжение стока возросло настолько, что из-за уменьшения сечения канала и увеличения его сопротивления (108) наступает ограничение роста тока I_C .

Напряжение стока в точке B называется **напряжением насыщения** $U_{\text{НО}}$ и отражает прекращение нарастания тока I_C .

Участок характеристики 1 (рис. 69) OA называется **областью проводимости канала** (омический участок), а пологий участок BC — **областью насыщения**, который и является рабочим участком выходной характеристики полевого транзистор с управляющим p - n -переходом. Незначительное изменение тока стока на рабочем участке объясняется двумя причинами:

1) с увеличением напряжения «сток — исток» почти пропорционально возрастает сопротивление канала (108) за счет его сужения;

2) с дальнейшим ростом напряжения «сток — исток» приблизительно все внутреннее падение напряжения сосредоточено в самой узкой части канала со стороны стока.

В результате в области канала напряженность электрического поля может быть высокой. В этом случае плотность дрейфового тока (110) достигает насыщения и не зависит от напряжения «сток — исток». Это происходит потому, что подвижность носителей μ_p уменьшается с увеличением напряженности электрического поля E , а дрейфовая скорость V их движения достигает насыщения:

$$V = \mu_p \cdot E = V_{\text{НАС}} \approx \text{const}, \quad (111)$$

то есть можно отметить, что при увеличении напряжения «сток — исток» происходит возрастание напряженности электрического поля, уменьшение подвижности носителей заряда и плотность дрейфового тока на рабочем участке BC приблизительно постоянна:

$$i_{\text{ДР}} = e \cdot \rho_p \cdot V_{\text{НАС}} \approx \text{const}. \quad (112)$$

Лишь при значительном увеличении напряжения «сток — исток» может наступить пробой p - n -перехода и ток стока I_C будет лавинообразно возрастать.

На рис. 69 отмечена нерабочая область полевого транзистора с управляющим p - n -переходом, которая ограничивается тремя параметрами: максимально-допустимым током стока — $I_{C, \text{макс}}$; максимально-допустимым напряжением «сток — исток» — $U_{\text{си, доп}}$; максимально-допустимой мощностью рассеяния стока — $P_{C, \text{макс}}$.

На рабочем участке BC угол наклона выходной характеристики близок к нулю, поэтому выходное сопротивление $R_{\text{вых}}$ полевого транзистора с управляющим p - n -переходом велико и имеет значение порядка сотен кОм.

Если на затвор относительно истока подать положительное напряжение $U_{\text{зи2}} = +2$ В, то исходное сечение канала S_K уменьшается, сопротивление канала r_K возрастает и выходная характеристика $2I_C = f(U_{\text{си}})$ при $U_{\text{зи}} > 0$ в области проводимости пойдет под меньшим углом наклона $\alpha_2 < \alpha_1$, а в режиме насыщения — ниже, чем выходная характеристика 1. Насыщение канала для выходной характеристики 2 наступает при меньшей величине напряжения сток-исток:

$$U_{\text{н1}} \approx U_{\text{н0}} - U_{\text{зи2}}. \quad (113)$$

При дальнейшем увеличении напряжения «затвор — исток» $U_{\text{зи2}} = +4$ В происходит уменьшение тока стока I_C и выходная характеристика 3 пойдет еще ниже, как это показано на рис. 69.

5.3. Сток-затворные характеристики полевого транзистора с управляющим p - n -переходом

Под *сток-затворной характеристикой* полевого транзистора понимается зависимость тока стока от напряжения «затвор — исток» при постоянном значении напряжения «сток — исток»:

$$I_C = f(U_{\text{зи}}) \Big|_{U_{\text{си}} = \text{const}} \quad (114)$$

На рис. 70 приведено семейство сток-затворных характеристик полевого транзистора с каналом p -типа. Характеристика 1 соответствует напряжению «сток — исток» $U_{\text{си1}} = -10$ В. Из зависимости 1 следует, что при некотором напряжении $U_{\text{зи}} = U_{\text{зотс}}$ ток стока $I_C = 0$. Минимальное напряжение «затвор — исток», при котором ток стока равен

нулю, называется **напряжением отсечки** $U_{з.отс}$. Значение напряжения отсечки определяется равновесной шириной канала.

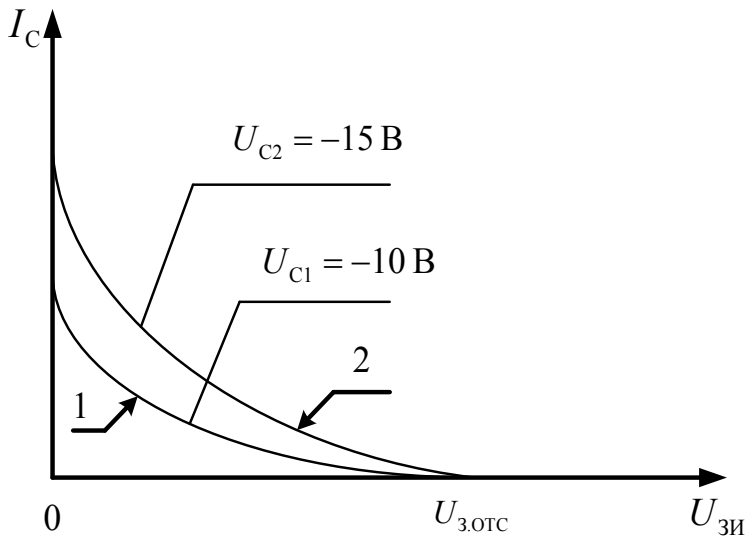


Рис. 70. Сток-затворные характеристики полевого транзистора с управляющим p - n -переходом и каналом p -типа

При $U_{ЗИ} = 0$ через полевой транзистор протекает максимальный ток, сечение канала в этом случае максимальное, а сопротивление канала наименьшее. При увеличении напряжения «затвор — исток» управляющий p - n -переход расширяется в область слаболегированного полупроводника p -типа ($I_{ОБР}$ увеличивается) и сечение канала уменьшается, что приводит к росту сопротивления канала $r_K = l_K / (\delta \cdot S_K)$ и уменьшению тока стока.

При напряжении на затворе, равном напряжению отсечки, сечение канала становится приблизительно нулевым, транзистор запирается, а ток стока стремится к нулю (рис. 70).

При подаче на сток напряжения $U_{СИ2} = -15$ В ток стока изменится незначительно, так как это напряжение соответствует рабочему режиму полевого транзистора, поэтому сток-затворная характеристика в этом случае (зависимость 2, рис. 70) пойдет несколько выше, чем зависимость 1 при напряжении $U_{СИ} = -10$ В. Отсюда следует, что при разных напряжениях «сток — исток» в рабочем режиме сток-затворные характеристики полевого транзистора идут очень близко друг к другу, а напряжение отсечки практически не изменяется. С учетом это-

го факта в справочниках приводится сток–затворная характеристика полевого транзистора с управляющим p - n -переходом при одном напряжении «сток — исток».

5.4. Влияние температуры на сток–затворную характеристику полевого транзистора с управляющим p - n -переходом

При изменении температуры окружающей среды на ход сток–затворной характеристики полевого транзистора влияют два фактора:

1) с ростом температуры уменьшается подвижность носителей заряда в канале, которая определяется соотношением $\mu = AT^{-3/2}$;

2) с увеличением температуры уменьшается контактная разность потенциалов ϕ_K , а следовательно, и I_{OBR} .

Сток–затворные характеристики с учетом изменения температуры окружающей среды представлены на рис. 71. Зависимость 1 (рис. 71) соответствует комнатной температуре $T_1 = +20^\circ\text{C}$, а зависимость 2 — $T_2 = +70^\circ\text{C}$.

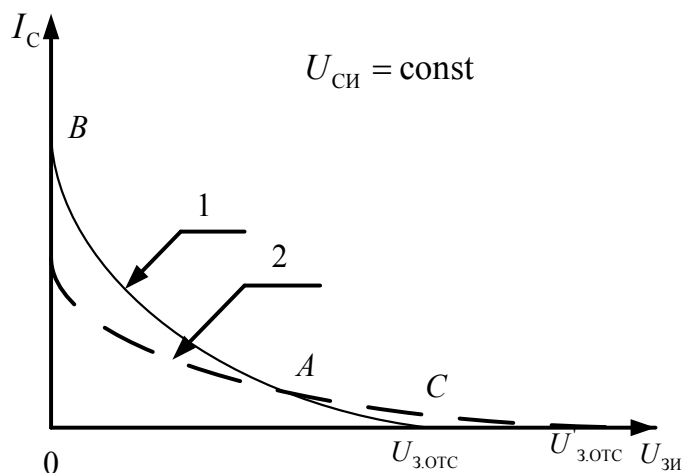


Рис. 71. Сток–затворные характеристики полевого транзистора с управляющим p - n -переходом при различных температурах окружающей среды:
1 — $T_1 = +20^\circ\text{C}$, 2 — $T_2 = +70^\circ\text{C}$

На участке AB зависимости 1 (рис. 71) при повышении температуры преобладает первый фактор. При увеличении температуры умень-

шается подвижность носителей заряда, это приводит к уменьшению электропроводности канала, следовательно, к росту сопротивления канала и снижению значения тока стока, что и нашло отражение в зависимости 2 (рис. 71) на участке AB . На участке AC сток-затворной характеристики полевого транзистора при повышении температуры окружающей среды преобладающим является второй фактор. При этом повышение температуры ведет к снижению высоты потенциального барьера управляющего p - n -перехода, к уменьшению его ширины, а следовательно, к увеличению сечения канала, росту тока стока и напряжения отсечки. Для T_2 (зависимость 2 рис. 71) напряжение отсечки равно $U'_{з.отс.}$.

Участок AC сток-затворной характеристики полевого транзистора получил наименование термостабильной области. В точке A сток-затворной характеристики оба фактора влияния температуры компенсируют друг друга и точка A называется **термостабильной точкой**.

Таким образом, в зависимости от режима работы полевого транзистора результирующий температурный коэффициент напряжения может быть положительным, отрицательным и даже нулевым. От напряжения отсечки до точки A (рис. 71) сток-затворная характеристика с увеличением температуры идет выше первоначальной или сливается с ней, а левее точки A - идет ниже, то есть из-за увеличения r_k (108) ток стока I_C уменьшается. Для маломощных полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом термостабильная область (точка) лежит в интервале небольших токов стока: $I_C = (50-500)$ мкА.

5.5. Параметры полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом

Параметры полевых транзисторов определяются из связи между выходным током — током стока и напряжениями «затвор — исток», «сток — исток»:

$$I_C = f(U_{зи}, U_{си}). \quad (115)$$

Из функционального уравнения (115) получаем дифференциальное уравнение в частных производных вида

$$dI_C = (\partial I_C / \partial U_{зи}) dU_{зи} + (\partial I_C / \partial U_{си}) dU_{си}. \quad (116)$$

Другая запись уравнения (116) имеет вид

$$dI_C = S \cdot dU_{3И} + (1/R_i) dU_{СИ}. \quad (117)$$

Из уравнения (117) находятся основные статические параметры полевых транзисторов: крутизна характеристики — S ; внутреннее сопротивление — R_i ; статический коэффициент усиления по напряжению — μ .

Эффективность управляющего действия затвора в полевых транзисторах оценивается крутизной сток-затворной характеристики. **Крутизна на характеристики** S показывает, на сколько миллиампер изменяется величина тока стока при изменении напряжения на затворе на один вольт.

$$S = (\partial I_C / \partial U_{3И}) = (dI_C / dU_{3И}) \Big|_{U_{СИ} = \text{const}}. \quad (118)$$

При определении крутизны S напряжение «сток — исток» должно оставаться постоянным. Графически величина S соответствует крутизне сток-затворной характеристики, то есть наклону касательной в заданной точке сток-затворной характеристики. Поскольку ток стока нелинейно зависит от напряжения на затворе, то и крутизна характеристики является функцией напряжения на затворе: $S = f(U_{3И})$. В зависимости от типа полевого транзистора крутизна маломощных транзисторов имеет значение порядка $S = (1,5-2,0)$ мА/В.

Внутреннее сопротивление полевого транзистора R_i характеризуется воздействием напряжения стока на ток стока и определяется из выражения

$$R_i = (\partial U_{СИ} / \partial I_C) = (dU_{СИ} / dI_C) \Big|_{U_{3И} = \text{const}}. \quad (119)$$

Внутреннее сопротивление R_i полевого транзистора — это отношение изменения выходного напряжения (напряжения «сток — исток») к изменению выходного тока (тока стока) при постоянном напряжении на затворе. По физическому смыслу этот параметр показывает сопротивление полевого транзистора переменному току и составляет сотни кОм в зависимости от типа полевого транзистора. Графически внутреннее сопротивление соответствует наклону касательной в заданной точке выходной характеристики полевого транзистора. Чем выше идет выходная характеристика полевого транзистора, тем большее значение имеет внутреннее сопротивление.

Статическим коэффициентом усиления по напряжению μ называют отношение изменения напряжения «сток — исток» к изменению напряжения «затвор — исток» при неизменном токе стока:

$$\mu = (\partial U_{СИ} / \partial U_{3И}) = (dU_{СИ} / dU_{3И}) \Big|_{I_C = \text{const}}. \quad (120)$$

Статический коэффициент усиления по напряжению показывает, во сколько раз напряжение на затворе сильнее влияет на ток стока по сравнению с напряжением на стоке. Значение μ , как правило, много больше единицы. Если дифференциальное уравнение (117) приравнять нулю, то получим:

$$dI_C = S \cdot dU_{зи} + (1/R_i) \cdot dU_{си} = 0, \quad (121)$$

откуда
$$\mu = S \cdot R_i. \quad (122)$$

Уравнение (122) получило название **внутреннего уравнения**. Это уравнение широко применяется на практике для вычисления третьего параметра по двум известным.

Чтобы определить параметры полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом, необходимо иметь семейство выходных характеристик. Крутизну характеристики и внутреннее сопротивление определяют графически по выходным характеристикам на рабочем участке (рис. 72), а также при лабораторных исследованиях методом двух отсчетов.

Крутизну характеристики $S = (\Delta I_C / \Delta U_{зи})|_{U_{си} = \text{const}}$ определяют по точкам *A* и *B* зависимостей 1 и 2 (рис. 72). Приращение тока стока находят как разность значений токов стока в точках *A* и *B* при напряжении «сток — исток» $U_{си} = U_{си \text{ ном}}$: $\Delta I_C = I_{C1} - I_{C2}$; а приращение напряжения «затвор — исток» — как разность напряжений на затворе между зависимостями 1 и 2 (рис. 72): $\Delta U_{зи} = U_{зи1} - U_{зи2}$.

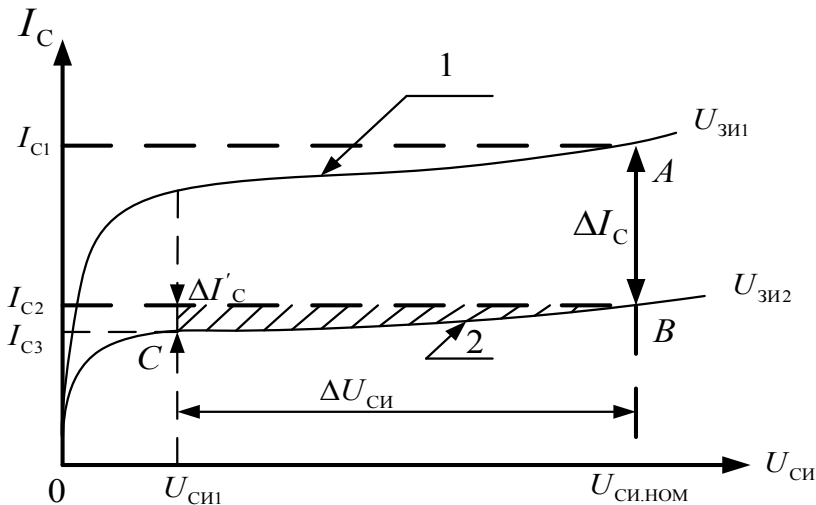


Рис. 72. Определение параметров полевых транзисторов по выходным характеристикам

Внутреннее сопротивление $R_i = (\Delta U_{\text{СИ}} / \Delta I_{\text{С}}) \big|_{U_{\text{ЗИ}} = \text{const}}$ определяют по точкам *B* и *C* (рис. 72), расположенным на рабочем участке, при напряжении $U_{\text{ЗИ}} = U_{\text{ЗИ2}} = \text{const}$: $\Delta U_{\text{СИ}} = U_{\text{СИ. ном}} - U_{\text{СИ1}}$; $\Delta I_{\text{С}} = I_{\text{С2}} - I_{\text{С3}}$.

Значение статического коэффициента усиления по напряжению определяется из уравнения (122) по найденным двум параметрам: *S* и R_i .

При лабораторных исследованиях параметры полевых транзисторов можно определить *методом двух отсчетов*. Для определения внутреннего сопротивления устанавливается номинальное напряжение «затвор – исток», а напряжение «сток – исток» нужно изменять в пределах всего рабочего участка. Для определения крутизны характеристики устанавливается номинальное значение напряжения «сток – исток», а напряжение на затворе изменяется на один вольт от номинального значения.

Параметры некоторых полевых транзисторов с управляющим *р-п*-переходом приведены в таблицах П.13, П.14, П.15.

5.6. Эквивалентные схемы полевого транзистора с управляющим *р-п*-переходом

Анализ работы полевых транзисторов в усилительных схемах при малом переменном сигнале удобно проводить с помощью эквивалентных схем. Эквивалентная схема является графическим отображением математической модели. *Эквивалентная схема* составляется из идеальных (линейных) элементов электрических цепей (сопротивлений, емкостей, индуктивностей, генераторов тока или напряжения), обладает теми же свойствами, что и исходный объект (полевой транзистор) в рамках решаемой задачи, например в заданном диапазоне частот входного сигнала, и является более удобной для анализа.

По способу построения различают физические и формальные эквивалентные схемы. Формальные эквивалентные схемы называют еще схемами замещения. *Физические эквивалентные схемы* составляют на основании физических представлений для конкретных типов конструкций транзистора, для заданного частотного диапазона, ориентируясь на определенную схему включения транзистора. Каждый вывод физической эквивалентной схемы соответствует электроду транзистора. Таким образом, физическая эквивалентная схема учитывает структуру транзистора и физические процессы в нем.

Исходя из принципа действия и структуры маломощного планарного полевого транзистора с управляющим p - n -переходом, можно составить его эквивалентную схему для области низких частот и схемы включения с общим истоком, которая представлена на рис. 73.

Сопротивления r_c и $r_{и}$ представляют собой объемные сопротивления кристалла полупроводника на участках между концами канала и контактами стока и истока соответственно. Эти сопротивления зависят от конструкции полевого транзистора, технологии его изготовления, имеют порядок сотен Ом, и на низких частотах их влиянием можно пренебречь.

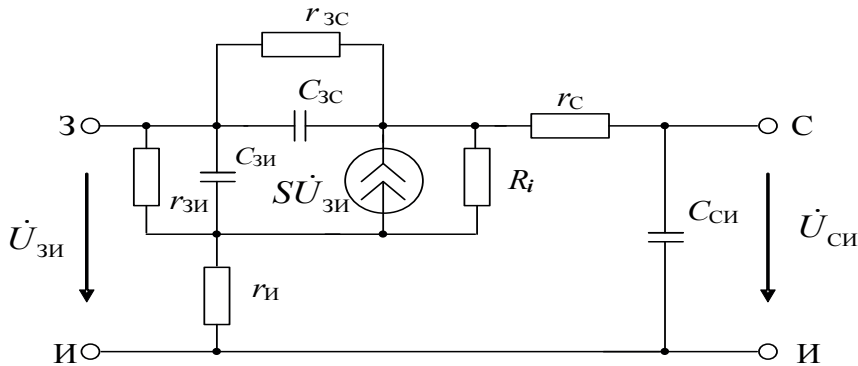


Рис. 73. Физическая эквивалентная схема полевого транзистора с управляющим p - n -переходом

Емкости $C_{зи}$ и $C_{зс}$, сопротивления $r_{зи}$ и $r_{зс}$ отражают в эквивалентной схеме p - n -переход с его барьерной емкостью и дифференциальным сопротивлением при обратном смещении. Так как сопротивление закрытого p - n -перехода в кремниевых полевых транзисторах велико и составляет величину порядка десятки-сотни МОм, то $r_{зи}$ и $r_{зс}$ в большинстве случаев можно не учитывать. В выходную цепь включены: внутреннее сопротивление транзистора R_i (характеризует воздействие напряжения стока на ток стока), генератор тока $SU_{зи}$, который определяет управляемую составляющую выходного тока и отражает усилительные свойства транзистора, межэлектродная емкость $C_{си}$, величина которой зависит от конструкции и материала полупроводника полевого транзистора.

Поясним роль проходной емкости затвор-сток ($C_{зс}$, рис. 73). Составляющая входного тока, протекающего через $C_{зс}$, будет равна:

$$(\dot{U}_{вх} - \dot{U}_{вых}) \cdot j\omega C_{зс} = \dot{U}_{вх} (1 + \dot{K}_v) \cdot j\omega C_{зс}. \quad (123)$$

На низких частотах входная проводимость равна $(1 + K_U) \cdot j\omega C_{3C}$, что соответствует емкости $(1 + K_U) \cdot C_{3C}$. Отсюда полная входная емкость полевого транзистора равна:

$$C_{BX} = C_{3И} + (1 + K_U) \cdot C_{3C}, \quad (124)$$

при $R_H \neq 0$ ($K_U \neq 0$), или $C_{BX} = C_{3И} + C_{3C}$ при $R_H = 0$ ($K_U = 0$). Таким образом, емкость C_{3C} заметно увеличивает входную емкость усилительного каскада на полевом транзисторе (эффект Миллера). С ростом частоты входного переменного напряжения увеличивается обратная связь через цепь r_{3C} , C_{3C} (рис. 73), что эквивалентно уменьшению полного входного сопротивления полевого транзистора и уменьшению его усиления по напряжению. Следовательно, при разработке конструкции полевых транзисторов необходимо уменьшать емкость «затвор — сток».

Для практических расчетов наиболее удобна эквивалентная схема, приведенная на рис. 74, хотя она значительно хуже отражает действительные физические процессы, протекающие в полевых транзисторах.

Кроме физических эквивалентных схем полевого транзистора применяют и формальные эквивалентные схемы (*схемы замещения*) с Y -, Z - или H -параметрами. Так как входные и выходные сопротивления полевых транзисторов велики, то удобнее измерять и задавать комплексные параметры проводимостей схемы замещения, которая приведена на рис. 75.

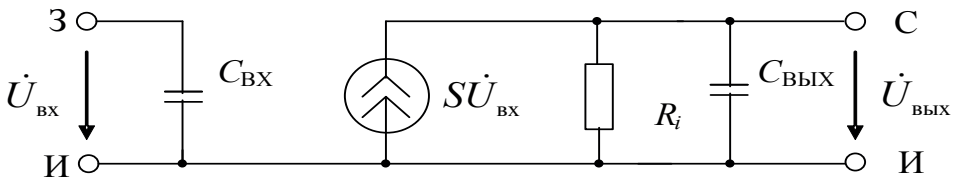


Рис. 74. Модифицированная эквивалентная схема полевого транзистора

Токи и напряжения на выводах полевого транзистора в режиме малого сигнала для схемы с общим истоком (рис. 75) соответствуют следующим *характеристическим уравнениям четырехполюсника*:

$$\dot{I}_3 = y_{11И} \cdot \dot{U}_{3И} + y_{12И} \cdot \dot{U}_{СИ}, \quad (125)$$

$$\dot{I}_C = y_{21И} \cdot \dot{U}_{3И} + y_{22И} \cdot \dot{U}_{СИ}. \quad (126)$$

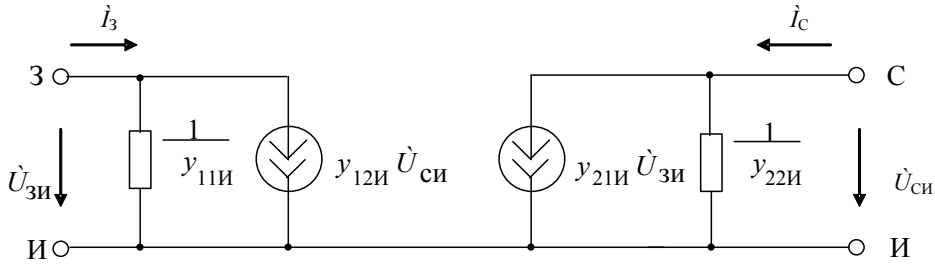


Рис. 75. Формальная эквивалентная схема полевого транзистора, соответствующая системе Y -параметров

Y -параметры определяются при реализации режимов *короткого замыкания по переменному току* на входе и выходе транзистора:

$$y_{11И} = \dot{I}_3 / \dot{U}_{3И} \Big|_{\dot{U}_{СИ} = 0}, \quad y_{12И} = \dot{I}_3 / \dot{U}_{СИ} \Big|_{\dot{U}_{3И} = 0}, \quad (127)$$

$$y_{21И} = \dot{I}_С / \dot{U}_{3И} \Big|_{\dot{U}_{СИ} = 0}, \quad y_{22И} = \dot{I}_С / \dot{U}_{СИ} \Big|_{\dot{U}_{3И} = 0}. \quad (128)$$

Если эти режимы воспроизвести на эквивалентной схеме рис. 73, то можно найти формулы перехода от параметров элементов физической эквивалентной схемы к Y -параметрам. Пренебрегая малыми проводимостями p - n -перехода и объемными сопротивлениями полупроводника около истока и стока, получим матрицу Y -параметров для схемы включения полевого транзистора с общим истоком:

$$[Y] = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix}, \quad (129)$$

где $y_{11} = j\omega (C_{3И} + C_{3С})$, $y_{12} = -j\omega C_{3С}$,
 $y_{21} = S - j\omega C_{3С}$, $y_{22} = 1/R_i + j\omega C_{СИ}$.

Все эти параметры зависят от значений постоянных напряжений на электродах полевого транзистора, поэтому должны вычисляться в заданной рабочей точке.

5.7. Лабораторное задание № 6 «Исследование характеристик и параметров полевых транзисторов с управляющим *p-n*-переходом»

Цель работы

Ознакомиться с конструкцией полевых транзисторов с управляющим *p-n*-переходом, их принципом действия, характеристиками и параметрами различных транзисторов. Исследовать влияние температуры на характеристики и параметры полевых транзисторов с управляющим *p-n*-переходом, а также зависимость параметров от режима работы транзистора.

1. Определить по справочным данным тип канала исследуемого полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом (смотри таблицы П.13, П.14, П.15, или [21–24]), зарисовать схему расположения его выводов и нарисовать схему экспериментального исследования, воспользовавшись примером, представленным на рис. 76.

2. Записать паспортные параметры исследуемого полевого транзистора, особо обратив внимание на предельно допустимые значения напряжений и токов.

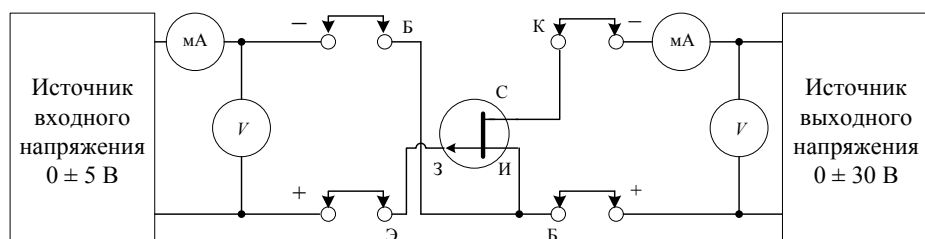


Рис. 76. Схема снятия характеристик полевого транзистора

3. Собрать разработанную схему для исследования полевого транзистора на лабораторном стенде, подключив все необходимые внешние измерительные приборы.

4. Снять семейство выходных характеристик $I_C = f(U_{СИ})$ при комнатной температуре для трех значений напряжения на затворе. Одно значение напряжения «затвор — исток» равно нулю, а два других значения напряжения «затвор — исток» необходимо выбрать на интервале от нуля до напряжения отсечки.

При снятии выходных характеристик необходимо задаваться напряжением на стоке от нуля до $U_{\text{СИ}} = U_{\text{СИ.НОМ}}$ и при этом отмечать значения тока стока. Результаты измерений занести в табл. 13.

Таблица 13

Пример оформления экспериментальных данных для полевого транзистора КП 103И

$U_{\text{ЗИ}}=0$		$U_{\text{СИ}}$ В	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$U_{\text{СИ.НОМ}} = 12 \text{ В}$
	T=20 °C	I_{C} , мА												
	T=70 °C	I_{C} , мА												
$U_{\text{ЗИ}}=0,75 \text{ В}$	T=20 °C	I_{C} , мА												
	T=70 °C	I_{C} , мА												
$U_{\text{ЗИ}}=1,5 \text{ В}$	T=20 °C	I_{C} , мА												
	T=70 °C	I_{C} , мА												

5. Снять сток-затворную характеристику полевого транзистора $I_{\text{C}} = f(U_{\text{ЗИ}})$ при постоянном напряжении на стоке равном $U_{\text{СИ}} = U_{\text{СИ.НОМ}}$.

Для точного снятия сток-затворной характеристики необходимо сначала определить напряжения отсечки, для этого нужно выставить требуемое напряжение $U_{\text{СИ.НОМ}}$ от выходного источника, затем, плавно увеличивая напряжение $U_{\text{ЗИ}}$ от входного источника, добиться прекращения тока через транзистор ($I_{\text{C}} \approx 0$).

Это важно!

Напряжение на затворе изменять от напряжения отсечки до нуля, причем до тока стока, равного $I_{\text{C}} = 500 \text{ мкА}$, изменять напряжение на затворе с шагом 0,2 В, а далее — с шагом 0,5 В.

6. Исследуемый полевой транзистор поместить в термостат, предварительно разогретый до температуры + (70–75) °C, и через 5 минут повторить пункты 4, 5.

Обработка результатов эксперимента

1. По экспериментальным данным построить графики выходных и сток-затворных характеристик.

2. По выходным характеристикам $I_{\text{C}} = f(U_{\text{СИ}})$, снятым при комнатной температуре, определить основные статические параметры S , R_i , μ на рабочем участке.

3. На сток-затворных характеристиках $I_C = f(U_{зи})$ определить термостабильную точку и термостабильную область.
4. Используя сток-затворную характеристику $I_C = f(U_{зи})$, снятую при комнатной температуре, рассчитать и построить график зависимости $S = f(U_{зи})$ при $U_{си} = U_{си. ном.}$
5. Проанализировать результаты измерения и расчетов, найдя причинное объяснение хода характеристик и полученных значений параметров.

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Формулировку цели исследования;
2. Схему для исследования полевого транзистора;
3. Паспортные данные и схему расположения выводов исследуемого полевого транзистора;
4. Таблицы результатов экспериментальных измерений;
5. Расчет статических параметров исследованного полевого транзистора;
6. Семейство выходных характеристик исследованного полевого транзистора при комнатной и повышенной температурах;
7. Семейство сток-затворных характеристик исследованного полевого транзистора с обозначением термостабильной точки (области);
8. Таблицу расчетных значений и график зависимости $S = f(U_{зи})$ при напряжении стока $U_{си} = U_{си. ном.}$;
9. Анализ полученных результатов.

5.8. Контрольные вопросы

1. Дайте определение полевого транзистора.
2. На чем основано управление током в полевом транзисторе?
3. Объясните устройство и принцип действия полевого транзистора с управляющим p - n -переходом.
4. Как зависит сопротивление канала от электропроводности полупроводника, площади и длины канала?
5. Какую роль в полевых транзисторах выполняет затвор?
6. Как влияет сечение канала на ток полевого транзистора?
7. Какой полярности напряжение должно подаваться на затвор для эффективного управления током транзистора?

8. Как зависит сечение канала от величины напряжения, приложенного к стоку?

9. Нарисуйте выходные (стоковые) характеристики полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом и объясните их ход.

10. Нарисуйте сток-затворные характеристики полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом и объясните их ход.

11. Как влияет температура окружающей среды на ход сток-затворных и выходных характеристик полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом?

12. Что называется напряжением отсечки?

13. Какой электрический режим полевого транзистора называется режимом насыщения?

14. Какое напряжение стока носит название напряжения насыщения?

15. Какие основные отличия полевых транзисторов с управляющим *p-n*-переходом от биполярных транзисторов вы знаете?

16. В чем преимущества полевых транзисторов по сравнению с биполярными?

17. Назовите основные статические параметры полевых транзисторов.

18. Поясните методы определения статических параметров полевых транзисторов.

19. Нарисуйте эквивалентные схемы полевого транзистора для постоянного тока, для переменного тока. Поясните состав каждой эквивалентной схемы и различия между ними.

20. Нарисуйте схему замещения полевого транзистора. Почему эта схема использует *Y*-параметры?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шишкин Г. Г. Электроника : учебник для бакалавров, обучающихся по направлению 210300 «Радиотехника» / Г. Г. Шишкин, А. Г. Шишкин. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Юрайт, 2014. — 702 с.
2. Игнатов А. Н. Микросхемотехника и наноэлектроника : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подгот. дипломир. специалистов 210400 «Телекоммуникации» / А. Н. Игнатов. — СПб. : Лань, 2011. — 528 с.
3. Шука А. А. Электроника : учебное пособие / А. А. Шука ; под ред. А. С. Сигова. — СПб. : БХВ — Петербург, 2005. — 800 с.
4. Дулин В. Н. Электронные приборы : учебник / В. Н. Дулин, Н. А. Аваев, В. П. Демин [и др.]; под ред. Г. Г. Шишкина. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Энергоатомиздат, 1989. — 496 с.
5. Батушев В. А. Электронные приборы : учебник для вузов / В. А. Батушев. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Высшая школа, 1980. — 383 с.
6. Булычев А. Л. Электронные приборы : учебник / А. Л. Булычев, П. М. Лямин, Е. С. Тулинов. — М. : Лайт Лтд., 2001. — 416 с.
7. Пасынков В. В. Полупроводниковые приборы : учебник для вузов / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. — 5-е изд., испр. — СПб. : Лань, 2001. — 480 с.
8. Пасынков В. В. Материалы электронной техники : учебник для вузов / В. В. Пасынков, В. С. Сорокин. — СПб. : Лань, 2001. — 368 с.
9. Гусев В. Г. Электроника : учебное пособие / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Высшая школа, 1991. — 621 с.
10. Елфимов В. И. Основы теории p - n -перехода : учебное пособие / В. И. Елфимов, Н. С. Устыленко. — Екатеринбург : Изд-во УМЦ УПИ, 2000. — 55 с.

11. Епифанов Г. И. Физика твердого тела : учебное пособие для втузов / Г. И. Епифанов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Высшая школа, 1977. — 288 с.
12. Ржевкин К. С. Физические принципы действия полупроводниковых приборов / К. С. Ржевкин. — М. : Изд-во МГУ, 1986. — 256 с.
13. Тугов Н. М. Полупроводниковые приборы : учебник для вузов / Н. М. Тугов, Б. А. Глебов, Н. А. Чарыков ; под. ред. В. А. Лабунцова. — М. : Энергоатомиздат, 1990. — 576 с.
14. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: Кн. 1. Пер. с англ. — М. : Мир, 1984. — 456 с.
15. Антипов Б. Л. Материалы электронной техники. Задачи и вопросы: учебное пособие для вузов / Б. Л. Антипов, В. С. Сорокин, В. А. Терехов; под ред. В. А. Терехова. — 2-е изд. — СПб.: Лань, 2001. — 208 с.
16. Жеребцов И. П. Основы электроники: учебное пособие для вузов / И. П. Жеребцов. — 5-е изд., перераб. и доп. — Л. : Энергоатомиздат, 1989. — 352 с.
17. Рычина Т. А. Устройства функциональной электроники и электрорадиоэлементы / Т. А. Рычина, А. В. Зеленский. — М.: Радио и связь, 1989. — 352 с.
18. Горяинов С. А. Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением / С. А. Горяинов, И. Д. Абезгауз. — М. : Энергия, 1970. — 320 с.
19. Денискин Ю. Д. Электронные приборы : учебное пособие для вузов / Ю. Д. Денискин, А. А. Жигарев, Л. П. Смирнов; под ред. Р. А. Нилендера. — М.: Энергия, 1980. — 280 с.
20. Полупроводниковые приборы: Диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы : справочник / под ред. Н. Н. Горюнова. — М. : Энергоатомиздат, 1983. — 744 с.
21. Полупроводниковые приборы. Диоды выпрямительные, стабилитроны, тиристоры : справочник / под ред. А. В. Голомедова. — 2-е изд., стер. — М. : Радио и связь, изд. фирма «КУБК-а», 1994. — 527 с.
22. Справочник по полупроводниковым диодам, транзисторам и интегральным схемам / под общ. ред. Н. Н. Горюнова. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Энергия, 1976. — 744 с.
23. Полупроводниковые приборы: Транзисторы : справочник / под общ. ред. Н. Н. Горюнова. — 2-е изд., перераб. — М. : Энергоатомиздат, 1985. — 904 с.

24. Полупроводниковые приборы. Транзисторы малой мощности : справочник / под ред. А. В. Голомедова. - 2-е изд., стереотип. — М. : Радио и связь, 1994. — 384 с.
25. Полупроводниковые приборы. Транзисторы средней и большой мощности: справочник / под ред. А. В. Голомедова. — 2-е изд., стереотип. — М. : Радио и связь, 1994. — 640 с.
26. Мощные полупроводниковые приборы. Транзисторы : справочник / под ред. А. В. Голомедова. — М. : Радио и связь, 1985. — 560 с.
27. Шукстов В. Н. Исследования характеристик и параметров туннельных диодов : методические указания к лабораторной работе / В. Н. Шукстов, Т. И. Филатова. — Екатеринбург : УПИ, 1992. — 20 с.
28. Шукстов В. Н. Исследование характеристик и параметров биполярного транзистора в схеме с общей базой: методические указания к лабораторной работе / В. Н. Шукстов, Т. И. Филатова. — Свердловск : УПИ, 1990. — 23 с.
29. Шукстов В. Н. Исследование характеристик и параметров биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером : методические указания к лабораторной работе / В. И. Шукстов, Т. И. Филатова. — Екатеринбург : Издательство УПИ, 1990. — 16 с.
30. Устыленко Н. С. Исследование характеристик и параметров биполярного транзистора в схеме включения с общей базой : методические указания к выполнению лабораторной работы / Н. С. Устыленко, В. И. Елфимов. — Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. — 33 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Пример оформления титульного листа

Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Кафедра «Радиоэлектроника информационных систем»

Оценка работы _____
Преподаватель _____

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

Отчет по лабораторной работе № 1
по дисциплине «Электроника»

Подпись Дата Фамилия

Преподаватель _____ ФИО преподавателя
Студент _____ ФИО студента
Группа _____

Екатеринбург
2016

Таблица П.1

Параметры германиевых выпрямительных полупроводниковых диодов

Параметры	Д7Ж	Д302	Д305	ГД107А	ГД113А	ГД507А
Среднее прямое напряжение, $U_{\text{пр}}, \text{В}$	0,5	0,25	0,3	1,0	1,0	0,5
Импульсное прямое напряжение, В						4,0
Средний обратный ток мкА, при $U_{\text{обр}} = U_{\text{обр. макс}}$	100	800	2500	20	250	50
Максимально-допустимое обратное напряжение, В	400	200	50	15	115	20
Средний прямой ток, $I_{\text{пр. макс}}, \text{мА}$	300	1000	10000	20	15	16
Импульсный прямой ток, мА	1000	4000	20000		48	200
Рабочая частота, кГц	2,4	5,0	5,0			

Таблица П.2

Параметры кремниевых выпрямительных полупроводниковых диодов

Параметры	Д226А	Д242Б	КД102Б	КД103А	КД105Б	КД106А
Среднее прямое напряжение, $U_{\text{пр}}, \text{В}$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Импульсное прямое напряжение, В				2,5		
Средний обратный ток, мкА, при $U_{\text{обр}} = U_{\text{обр. макс}}$	50	3	0,1	1,0	100	10
Максимально-допустимое обратное напряжение, В	300	100	300	50	400	100
Средний прямой ток, $I_{\text{пр. макс}}, \text{мА}$	300	5000	100	100	300	300
Импульсный прямой ток, мА	2500	15000	2000	2000	15000	3000
Рабочая частота, кГц	1,0	1,2		20	1,0	30

Таблица П.3

Параметры стабилизаторов с полевым пробоем

Параметры	KC133Г	KC147A	KC156A	2 C439A	KC456A
Напряжение стабилизации номинальное (I_{CT} , мА), В	3,3 (5)	4,7 (10)	5,6 (10)	3,9 (51)	5,6 (30)
Разброс напряжения стабилизации	3,0–3,6 В	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$
Максимальный ток стабилизации, мА	37,5	58	55	176	139
Минимальный ток стабилизации, мА	1	3	3	3	3
Прямое напряжение при $I_{ПР} = 50$ мА (не более), В	1	1	1		
Постоянный обратный ток при $U_{OBR} = 0,7 U_{CT. ном.}$, мА	0,3	1	1		
Постоянный прямой ток, мА	50				
Дифференциальное сопротивление (I_{CT} , мА), Ом	150 (5)	56 (10)	46 (10)	12 (51)	10 (30)
Температурный коэффициент напряжения стабилизации, %/град	–0,015	–0,09– 0,01	$\pm 0,05$	–0,1	0,05
Рассеиваемая мощность, мВт	125	300	300	1000	1000

Таблица П.4

Параметры стабилизаторов с лавинным пробоем

Параметры	Д814А	Д814В	Д814Д	2С168А	2С175Ж	КС191Ж
Напряжение стабилизации номинальное (I_{CT} , мА), В	8,0 (5)	10,0 (5)	13,0 (5)	6,8 (10)	7,5 (4)	9,1 (4)
Разброс напряжения стабилизации	7,0– 8,5 В	9,0– 10,5 В	11,5– 14,0 В	$\pm 10\%$	7,1– 7,9 В	8,6– 9,6 В
Максимальный ток стабилизации, мА	40	32	24	45	17	14
Минимальный ток стабилизации, мА	3	3	3	3	0,5	0,5
Прямое напряжение при $I_{ПР} = 50$ мА, В	1	1	1	1	2	2
Постоянный обратный ток (U_{OBR} , В) не более, мкА	0,1 (1)	0,1 (1)	0,1 (1)	1000 (4,5)	20 (5)	20 (6)

Окончание табл. П.4

Параметры	Д814А	Д814В	Д814Д	2С168А	2С175Ж	КС191Ж
Постоянный прямой ток, мА					50	50
Дифференциальное сопротивление ($I_{СТ}$, мА), Ом	6 (5)	12 (5)	18 (5)	28 (10)	200 (0,5)	200 (0,5)
Температурный коэффициент напряжения стабилизации, %/град	0,07	0,09	0,095	$\pm 0,06$	0,07	0,09
Рассеиваемая мощность, мВт	340	340	340	300	125	125

Таблица П.5

Туннельные германиевые диоды типа ГИ103, ГИ304

Параметры	ГИ103А	ГИ103Б	ГИ103Г	ГИ304А	ГИ304Б
Ток пика, мА	1,3–1,7	1,3–1,7	1,3–2,1	4,5–5,1	4,9–5,5
Отношение тока пика к току впадины	>4	>4	>4	>5	>5
Напряжение пика, мВ	60–90	60–90	60–90	<75	<75
Напряжение раствора (не менее), В	0,52	0,52	0,52	0,44	0,44
Емкость диода на частоте 20 МГц (не более), пФ	1,5	1,4	2	20	20

Таблица П. 6

Туннельные германиевые диоды типа ГИ305, ГИ307, ГИ308

Параметры	ГИ305А	ГИ305Б	ГИ307А	ГИ308А	ГИ308В
Ток пика, мА	9,1–10	9,8–11	1,8–2,2	4,5–5,5	9–11
Отношение тока пика к току впадины	>5	>5	>7	>5	>5
Напряжение пика, мВ	<85	<85	<70	70–100	60–110
Напряжение раствора (не менее), В	0,45	0,45	0,4	0,51–0,63	0,51–0,63
Емкость диода на частоте 20 МГц (не более), пФ	30	30	20	1,5–5	4–10

Таблица П.7

Туннельные диоды из арсенида галлия типа АИ101, АИ201

Параметры	АИ101А	АИ101Е	АИ201А	АИ201Г	АИ201К
Ток пика, мА	0,75–1,25	4,5–5,5	9–11	18–22	90–110
Отношение тока пика к току впадины	>5	>6	>10	>10	>10
Напряжение пика, В	<0,16	<0,18	<0,2	<0,2	<0,33
Напряжение раствора (не менее), В	1,4	1,4	1,45	1,45	1,45
Емкость диода (не более), пФ	4	8	8	10	20

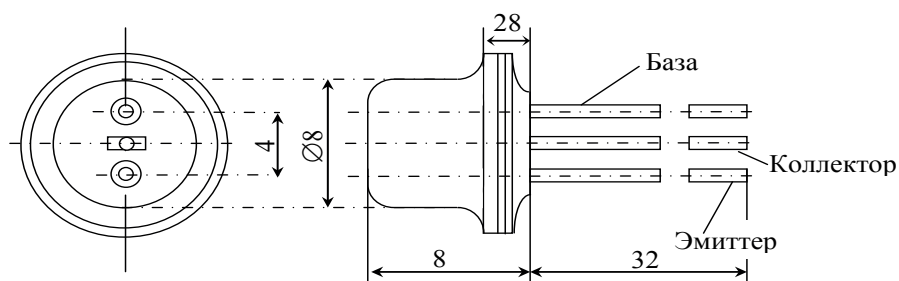
Таблица П.8

Туннельные диоды из арсенида галлия типа АИ301, АИ306

Параметры	АИ301А	АИ301Б	АИ301Г	АИ306Е	АИ306 К
Ток пика, мА	1,6–2,4	4,5–5,5	9–11	1,8–2,2	4,5–5,5
Отношение тока пика к току впадины	>8	>8	>8	>8	>8
Напряжение пика, В	<0,18	<0,18	<0,18	<0,17	<0,17
Напряжение раствора (не менее), В	0,65	0,85–1,15	0,8	0,85	0,85
Емкость диода (не более), пФ	12	25	25	15	12

Таблица П.9

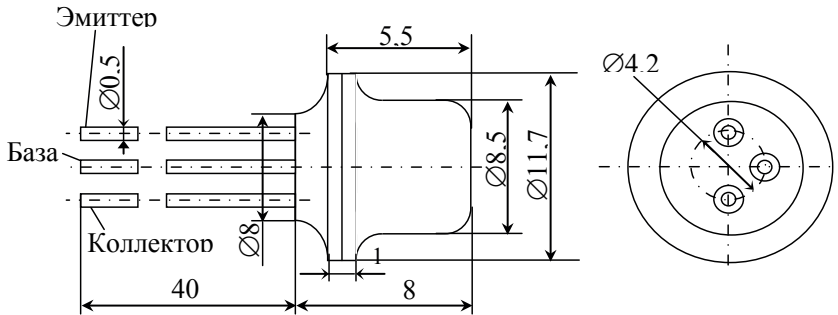
Германиевые сплавно-диффузионные *p-n-p* транзисторы



Параметры	ГТ321А	ГТ321Б	ГТ321Г	ГТ321Д
Коеф. передачи тока (β)	20–60	40–120	20–60	40–120
Макс. напряжение коллектора, В	50	50	40	40
Мощность, рассеиваемая транзистором при температуре до 45 °С, Вт	0,16	0,16	0,16	0,16
Сопротивление базы, Ом	100	100	100	100

Таблица П.10

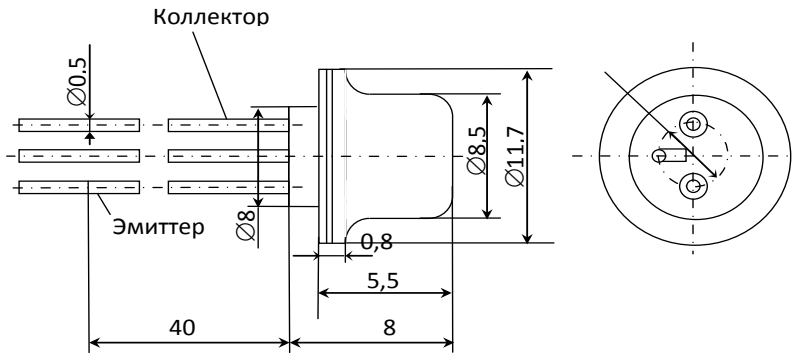
Германиевые сплавные *p-n-p* НЧ усилительные маломощные транзисторы



Параметры	ГТ125А	ГТ125Е	ГТ125И	ГТ125К
Коэф. передачи тока (β) при 20 °С	28–56	45–90	28–56	45–90
Обратный ток коллектора, не более, мкА	50	50	50	50
Максимальное напряжение коллектора, В	35	35	70	70
Мощность рассеиваемая транзистором при $T = 213–308$, мВт	150	150	150	150

Таблица П.11

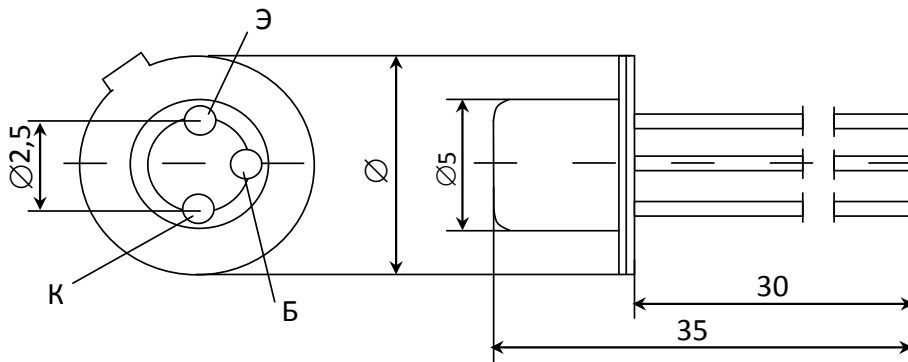
Германиевые сплавные *p-n-p* транзисторы типа МП-25, МП-26



Параметры	МП25	МП25Б	МП26	МП26Б
Коэф. передачи тока (β) при 20 °С	13–25	30–80	13–25	30–80
Соппротивление базы, Ом	160	160	160	160
Выходная проводимость (не более) максим.	1,5	1,5	1	1
Максимальное напряжение коллектора, В	40	40	70	70
Мощность, рассеиваемая транзистором при 35 °С, мВт	200	200	200	200

Таблица П.12

Кремниевые эпитаксиально-планарные *p-n-p* транзисторы



Параметры	2Т203А	2Т303А	2Т203Б	2Т203Г
Коэф. передачи тока	9	30–90	15–100	40
Входное сопротивление в схеме с ОЭ, Ом	300	300	300	300
Максимальное напряжение на коллекторе, В	60	30	15	60
Мощность, рассеиваемая транзистором, мВт	150	150	150	150

Таблица П.13.1

Полевые транзисторы с затвором на основе *p-n*-перехода и каналом *n*-типа (маломощные). Часть 1

Параметры	КП 302А	КП 302Б	КП 302В	2 П 303А	2 П 303В	2 П 303Е	2 П 307А
Крутизна h -ки, мА/В ($U_{си}$, В; $U_{зи}$, В)	5 (7; 0)	7 (7; 0)	5–7 (7; 0)	1–4 (10; 0)	2–5 (10; 0)	4 (10; 0)	4–9 (10; 0)
Напряжение отсечки, В ($U_{си}$, В; I_c , мкА)	5 (7; 10)	7 (7; 10)	10 (7; 10)	3 (10; 10)	4 (10; 10)	8 (10; 10)	(0,5–3) (10; 10)
Нач-ный ток стока, мА ($U_{си}$, В; $U_{зи}$, В)	3–24 (7; 10)	18–43 (7; 10)	33 (10; 0)	0,5–2,5 (10; 0)	1,5–5 (10; 0)	5–20 (10; 0)	3–9 (10; 0)
Ток утечки затвора, нА ($U_{си}$, В; $U_{зи}$, В)	10 (0; -10)	10 (0; -10)	10 (0; -10)	1 (0; -10)	1 (0; -10)	1 (0; -10)	1 (0; -10)
Коэффициент шума, 1 –дБ, 2 – нВ/√Гц ($U_{си}$, В; I_c , мА; f , кГц)	0,6–3 1 (8; -; 1)	0,6–3 1 (8; -; 1)	0,6–31 (8; -; 1)	30 2 (10; -; 1)	20 2 (10; -; 1)	4 дБ (10; -; 105)	6 дБ (10; 5; 4·105)

Окончание табл. П.13.1

Параметры	КП 302А	КП 302Б	КП 302В	2 П 303А	2 П 303В	2 П 303Е	2 П 307А
Входная емкость, пФ ($U_{си}$, В; I_c , мА; f , МГц)	20 (10;3)	20 (10;18)	20 (10;33)	6 (10; -,10)	6 (10; -,10)	6 (10;- ;10)	5 (10;- ;10)
Пропускная ем-ть, пФ ($U_{си}$, В; I_c , мА; f , МГц)	8 (10;3)	8 (10;18)	8 (10;33)	2 (10;- ;10)	2 (10;- ;10)	2 (10;- ;10)	1,5 (10;- ;10)
Сопрот. «сток—исток», Ом ($U_{си}$, В; $U_{зи}$, В)	100— 150 (0;2;0)	150 (0,2;0)	100 (0,2;0)	—	—	—	—
Предельные эксплуатационные данные							
Постоянное напряжение «сток — исток», В	20	20	20	25	25	25	25
Постоянное напряжение «затвор — сток», В	20	20	20	30	30	30	30
Постоянное напряжение «затвор — исток», В	10	10	12	30	30	30	30
Постоянный ток сто- ка, мА	24	43	33	20	20	20	30
Постоянный ток затво- ра, мА	6	6	6	5	5	5	5
Постоянная рас- сеиваемая мощность, мВт (T°)	300	300	300	200	200	200	250

Таблица П.13.2

**Полевые транзисторы с затвором на основе p - n -перехода и каналом n -типа
(маломощные). Часть 2**

Параметры	2П 307Б	2П 307Г	2П 308А9	2П 308Г9	2П 312А	КП 314А	КП 323А-2
Крутизна х-ки, мА/В ($U_{си}$, В; $U_{зи}$, В)	5—10 (10; 0)	6—12 (10; 0)	1—4 (10; 0)	1—4 (10; 0)	4 (15; 0)	4 (10; 0)	4—5,8 (10; 0)
Напряжение отсеч- ки, В ($U_{си}$, В; I_c , мкА)	(1—5) (10;10)	(1,5—6) (10;10)	(0,2—1,2) (10;0,01)	(1—6) (10; 0,01)	(2—8) (15;10)		(0,74—6) (10;10)
Нач-ный ток стока, мА ($U_{си}$, В; $U_{зи}$, В)	5—15 (10;0)	8—24 (10;0)	0,4—1 (10;0)	0,4—3 (10;0)	8—25 (15;0)	2,5—20 (10;0)	3—12 (10;0)
Ток утечки затвора, нА ($U_{си}$, В; $U_{зи}$, В)	1 (0;-10)	1 (0;-10)	1 (0;-10)	1 (0;-10)	10 (10;-10)		0,1

Окончание табл. П.13.2

Параметры	2П 307Б	2П 307Г	2П 308А9	2П 308Г9	2П 312А	КП 314А	КП 323А-2
Коэффициент шума, 1 — дБ, 2 — нВ/√Гц ($U_{си}$, В; I_c , мА; f , кГц)	6 дБ (10;5; 4·105)	6 дБ (10;5; 4·105)			4 дБ (10;-; 4·105)		52 (5;5;1)
Входная емкость, пФ ($U_{си}$, В; I_c , мА; f , МГц)	5 (10;- ;10)	5 (10;- ;10)			4 (15;-;-)	6 (10;- ;10)	2—4 (10;-;10)
Проходная ем-ть, пФ ($U_{си}$, В; I_c , мА; f , МГц)	1,5 (10;- ;10)	1,5 (10;-; 10)			1 (15;-;-)	2 (10;- ;10)	0,5—1,2 (10;-;10)
Сопрот. «сток — ис- ток», Ом ($U_{си}$, В; $U_{зи}$, В)	—	—	—	250 (0,2;0)			
Предельные эксплуатационные данные							
Постоянное напря- жение «сток — исток», В	25	25	25	25	20	25	20
Постоянное напря- жение «затвор — сток», В	30	30	30	30	25	30	25
Постоянное напря- жение «затвор— исток», В	30	30	30	30	25	30	25
Постоянный ток стока, мА	30	30	20	20	25	20	12
Постоянный ток затвора, мА	5	5	5	5	-	5	5
Постоянная рас- сеиваемая мощность, мВт (Т°)	250	250	80	80	100	200	100

Таблица П.13.3

**Полевые транзисторы с затвором на основе *p-n*-перехода и каналом *n*-типа
(маломощные). Часть 3**

Параметры	КП 329А	2П 333А	2П 335А-2	2П 336Б-1	2П 340Б-1	2П 341А	2П 364А
Крутизна х-ки, мА/В ($U_{си}$, В; $U_{зи}$, В)	3 (10; 0)	4 (10; 0)	4—5,8 (15; 0)	4 (10; 0)	4 (10; 0)	15 (5; 0)	1—4 (10; 0)

Окончание табл. П.13.3

Параметры	КП 329А	2П 333А	2П 335А-2	2П 336Б-1	2П 340Б-1	2П 341А	2П 364А
Напряжение отсечки, В ($U_{си}$, В; I_c , мкА)	1,5 (10;10)	(1–8) (10;10)	(2–8) (15;10)	(1,5–6) (10; 0,01)	(1,5–6) (10;10)	3 (5;100)	(0,5–3) (10;10)
Нач-ный ток стока, мА ($U_{си}$, В; $U_{зи}$, В)	1 (10;0)		8–25 (15;0)	5		20 (5;0)	0,5–2,5 (10;0)
Ток утечки затвора, нА ($U_{си}$, В; $U_{зи}$, В)	1 (0;–10)	0,2 (0;–10)	10 (0;–10)	1 (0;–10)	1	1 (0;–10)	1 (0;–10)
Коэффициент шума, 1 –дБ, 2 – нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ ($U_{си}$, В; I_c , мА; f , кГц)	20 2 (10;–1)	20 2 (10;10; 0,75)	1–4 дБ (10;5; 400)	20 2 (7;5;1)	20 2 (7;5;1)	2,8 дБ (5;45; 400)	30 2 (0;–;–)
Входная емкость, пФ ($U_{си}$, В; I_c , мА; f , МГц)	6 (10;–; 10)	6 (10;–;–)	2–4 (15;–;–)	6 (10;–; 10)	6 (10;–; 10)	5 (5;5;15)	
Проподная ем-ть, пФ ($U_{си}$, В; I_c , мА; f , МГц)	–	–	0,5–1 (15;–;–)			1,0 (5;–;15)	
Сопрот. «сток–ис- ток», Ом ($U_{си}$, В; $U_{зи}$, В)	1500 (0,5;0)	–	–	150 (–; 0)	–	–	
Предельные эксплуатационные данные							
Постоянное напря- жение «сток–ис- ток», В	50	50	20	25	25	15	25
Постоянное напря- жение «затвор–сток», В	50	50	25	30	30	15	30
Постоянное напря- жение «затвор – ис- ток», В	45	45	25	30	30	10	30
Постоянный ток сто- ка, мА	–	–	25	–	–	–	20
Постоянный ток за- твора, мА	–	–	–	5	5	5	5
Постоянная рас- сеиваемая мощность, мВт (T°)	250	250	100	60	60	150	200

Таблица П.14

**Полевые транзисторы с затвором на основе *p-n*-перехода и каналом *n*-типа
(средней и большой мощности)**

Параметры	2П 601А9	2П 701А	2П 702А	КП 801А	2П 802А	2П 903А	2П 914А
Крутизна ха- рактеристики, мА/В ($U_{си}$; $U_{зи}$, I_c , А)	50 (10; 0;-)	800—2100 (30;-; 5)	800—2100	600 (15;-;3)	800 (20;-;3,5)	85—140 (8;0;-)	30 (10;0;-)
Напряже- ние отсечки, В ($U_{си}$, В; I_c , мА)	4—12 (10;0,01)	—	—	25 (50;30)	25 (500;30)	(5—12) (5;0,01)	(8—30) (10;0,01)
Начальный ток стока, А ($U_{си}$, В; $U_{зи}$, В)	0,4 (10;0)	5—17 (30;-25)	8—16 (20;-;20)	-	-	0,7 (10;0)	0,25 (50;0)
Ток утечки за- твора, мкА ($U_{си}$, В; $U_{зи}$, В)	10 (-;-;15)	—	—	1000 (0;-35)	30 (0;-35)	0,1 (0;-15)	0,1 (0;-8)
Коэффициент шума, 1 —дБ, 2 — нВ/√Гц ($U_{си}$, В; I_c , мкА; f , кГц)	2,6—6 дБ (10;20; 400)	—	—	—	—	52 (10;10; 0,1)	6 дБ (40;20; 200)
Входная ем- кость, пФ ($U_{си}$, В; I_c , мА; f , МГц)	—	—	150 (50;-;-)	—	—	18 (20;20;-)	10 (20;20;-)
Проходная ем- кость, пФ ($U_{си}$, В; I_c , мА; f , МГц)	6 (10;-;-)	17—30 (30;-;10)	7 (50;-;-)	—	—	15 (20;20;-)	2,2 (20;20;-)
Сопротивле- ние «сток—ис- ток», Ом ($U_{си}$, В; $U_{зи}$, В)	—	1—3,5 (-;20)	0,52—1 (-;20)	22 (-;0)	3	2—10 (0,2;0)	23—50 (0,1;0)
Предельные эксплуатационные данные							
Постоян- ное напряже- ние «сток—ис- ток», В	20	500	300	65	500	20	50

Окончание табл. П.14

Параметры	2П 601А9	2П 701А	2П 702А	КП 801А	2П 802А	2П 903А	2П 914А
Постоян- ное напряже- ние «затвор — сток», В	20	510	310	100	535	20	80
Постоянное напряжение «затвор — ис- ток», В	15	25	30	35	35	15	30
Постоянный ток стока, А	—	—	—	5	2,5	0,7	0,1
Постоянный ток затвора, мА	5	—	—	—	1	15	5
Постоянная рассеиваемая мощность, Вт (Т°)	1	40	50	60	40	6	2,5

Таблица П.15

Полевые транзисторы с затвором на основе *p-n*-перехода и каналом *p*-типа

Параметры	2П 101А	2П 101В	2П 101АД	2П 201А	2П 201Б	2П 201Г
Крутизна характери- стики, мА/В ($U_{си}$, В; $U_{зи}$, В)	0,3 (-5; 0)	0,5 (-5; 0)	0,4 (-5; 0)	0,4—1,8 (-10; 0)	0,7—2,1 (-10; 0)	1,4—3,5 (-10; 0)
Напряжение отсечки, В ($U_{си}$, В; I_c , мкА)	5 (-5; 1)	8 (-5; 1)	6 (-5; 1)	0,4—1,4 (-10; 10)	0,5—2,2 (-10; 10)	1,4—4 (-10; 10)
Начальный ток стока, мА ($U_{си}$, В; $U_{зи}$, В)	0,3—1 (-5; 0)	0,5—5 (-5; 0)	0,3—4 (-5; 0)	0,3—0,65 (-10; 0)	0,55—1,2 (-10; 0)	1,7—3,8 (-10; 0)
Ток утечки затвора, нА ($U_{си}$, В; $U_{зи}$, В)	10 (0; 5)	10 (0; 5)	2 (0; 5)	5 (0; 5)	5 (0; 5)	5 (0; 5)
Коэффициент шума, 1 — дБ, 2 — нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ ($U_{си}$, В; I_c , мА; f , кГц)	5 дБ (-5; ; 1)	10 дБ (-5; ; 1)	7 дБ (-5; ; 1)	1 дБ (-5; ; 1)	1 дБ (-5; ; 1)	1 дБ (-5; ; 1)
Входная емкость, пФ ($U_{си}$, В; I_c , мА; f , МГц)	12 (-5; ; -)	12 (-5; ; -)	10 (-5; ; -)	17 (-10; ; -)	17 (-10; ; -)	17 (-10; ; -)

Окончание табл. П.15

Параметры	2П 101А	2П 101В	2П 101АД	2П 201А	2П 201Б	2П 201Г
Проходная емкость, пФ ($U_{си}$, В; I_c , мА; f , МГц)	2,7 (-5;-;-)	3 (-5;-;-)	- (-5;-;-)	8 (-10;-;-)	8 (-10;-;-)	8 (-10;-;-)
Предельные эксплуатационные данные						
Постоянное напряже- ние «сток—исток», В	10	10	10	10	10	10
Постоянное напряже- ние «затвор—сток», В	10	10	10	15	15	15
Постоянное напря- жение «затвор—ис- ток», В	10	10	10	15	15	15
Постоянный ток сто- ка, мА	2	—	5	—	—	—
Постоянный ток за- твора, мА	—	—	—	—	—	—
Постоянная рассеива- емая мощность, мВт (T°)	50	50	50	60	60	60

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫХ ПЕРЕХОДАХ.....	3
1.1. Понятие и образование электронно-дырочного перехода.....	3
1.2. Энергетическая диаграмма p - n -перехода в равновесном состоянии	8
1.3. Неравновесное состояние p - n -перехода.....	10
1.3.1. Прямосмещенный p - n -переход.....	10
1.3.2. Обратносмещенный p - n -переход	13
1.4. Вольтамперная характеристика реального p - n -перехода.....	16
1.4.1. Прямая ветвь вольтамперной характеристики реального p - n -перехода	16
1.4.2. Обратная ветвь ВАХ реального p - n -перехода	19
1.5. Лабораторное задание № 1 «Исследование характеристик и параметров полупроводниковых диодов».....	21
1.6. Контрольные вопросы	26
2. ВИДЫ ПРОБОЕВ P-N-ПЕРЕХОДА.....	28
2.1. Общая характеристика пробоя p - n -перехода	28
2.2. Тепловой пробой p - n -перехода.....	29
2.3. Полевой пробой	30
2.4. Лавинный пробой	33
2.5. Параметры стабилитронов.....	35
2.6. Параметрический стабилизатор напряжения	39
2.7. Лабораторное задание № 2 «Исследование характеристик и параметров стабилитронов»	41
2.8. Контрольные вопросы	45

3. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫХ ПЕРЕХОДАХ С ТУННЕЛЬНЫМ ЭФФЕКТОМ.....	47
3.1. Понятие и особенности электронно-дырочных переходов с туннельным эффектом	47
3.2. Вольтамперная характеристика идеального электронно-дырочного перехода с туннельным эффектом	51
3.3. Вольтамперная характеристика реального электронно-дырочного перехода с туннельным эффектом	57
3.4. Влияние температуры окружающей среды на ВАХ реального туннельного диода	60
3.5. Параметры электронно-дырочного перехода с туннельным эффектом	62
3.6. Использование туннельного диода в качестве усилителя.....	66
3.7. Лабораторное задание № 3 «Исследование характеристик и параметров туннельных диодов»	67
3.8. Контрольные вопросы	72
 4. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ	 74
4.1. Определение и классификация транзисторов	74
4.2. Устройство биполярного транзистора.....	75
4.3. Физические основы работы биполярного транзистора.....	77
4.4. Статические характеристики биполярного транзистора.....	80
4.4.1. Общие сведения о статических характеристиках	80
4.4.2. Входные характеристики биполярного транзистора в схеме включения с общей базой	80
4.4.3. Семейство выходных характеристик	84
4.5. Н-параметры биполярного транзистора в схеме включения с общей базой.....	89
4.6. Эквивалентные Т-образные схемы биполярного транзистора в схеме включения с общей базой.....	91
4.6.1. Т-образная эквивалентная схема транзистора на низких частотах.....	91
4.6.2. Т-образная эквивалентная схема транзистора на высоких частотах.....	92

4.7. Лабораторное задание № 4 «Исследование характеристик и параметров биполярного транзистора в схеме включения с общей базой»	94
4.8. Связь между токами биполярного транзистора в схеме включения с общим эмиттером.....	97
4.9. Входные характеристики биполярного транзистора в схеме включения с общим эмиттером.....	100
4.10. Выходные характеристики биполярного транзистора в схеме включения с общим эмиттером.....	103
4.11. Влияние температуры на выходные характеристики БТ в схеме включения с общим эмиттером.....	106
4.12. Влияние режима работы биполярного транзистора и температуры окружающей среды на коэффициент передачи по току в схеме включения с ОЭ	108
4.12.1. Зависимость коэффициента передачи по току от напряжения на коллекторе.....	108
4.12.2. Зависимость коэффициента передачи по току от тока коллектора	109
4.12.3. Зависимость коэффициента передачи по току от температуры окружающей среды	111
4.13. Система Н-параметров биполярного транзистора в схеме включения с общим эмиттером.....	112
4.14. Лабораторное задание № 5 «Исследование характеристик и параметров биполярного транзистора в схеме включения с общим эмиттером»	113
4.15. Контрольные вопросы	116
5. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ С УПРАВЛЯЮЩИМ <i>P-N</i>-ПЕРЕХОДОМ	119
5.1. Устройство и принцип действия полевого транзистора с управляющим <i>p-n</i> -переходом	119
5.2. Выходные характеристики полевого транзистора с управляющим <i>p-n</i> -переходом	122
5.3. Сток-затворные характеристики полевого транзистора с управляющим <i>p-n</i> -переходом	125
5.4. Влияние температуры на сток-затворную характеристику полевого транзистора с управляющим <i>p-n</i> -переходом.....	127

5.5. Параметры полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом	128
5.6. Эквивалентные схемы полевого транзистора с управляющим p - n -переходом	131
5.7. Лабораторное задание № 6 «Исследование характеристик и параметров полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом»	135
5.8. Контрольные вопросы	137
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	139
ПРИЛОЖЕНИЯ	142

Учебное издание

Дурнаков Андрей Адольфович
Елфимов Вячеслав Ильич

ЭЛЕКТРОНИКА

Редактор *В. О. Корионова*
Компьютерный набор *А. А. Дурнакова*
Верстка *Е. В. Ровнушкиной*

Подписано в печать 21.06.2016. Формат 70×100 1/16.
Бумага писчая. Плоская печать. Усл. печ.л. 12,9.
Уч.-изд. л. 7,44. Тираж 50 экз. Заказ 223.

Издательство Уральского университета
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
Тел.: 8 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ
620075, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: 8 (343) 350-56-64, 350-90-13
Факс: 8 (343) 358-93-06
E-mail: press-urfu@mail.ru

